

Пространственное распределение плотности потока радона с поверхности грунта на территории города Тюмени и его окрестностей

Гурьев Н.Е., Зонова Е.О.

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Особую роль среди естественных радионуклидов занимает радон и его короткоживущие дочерние продукты распада, которые формируют от 50 до 90 % от общей дозы облучения населения. Опасность для человека представляют закрытые плохо вентилируемые помещения, в которых он может накапливаться сверх установленного гигиенического норматива. Одной из причин накопления радона в зданиях и сооружениях является его эманирование из горных пород и грунтов. Для оценки потенциальной радоноопасности земельного участка, предназначенного под строительство зданий и сооружений, применяется методика измерения плотности потока радона с поверхности грунта. Цель исследования – радиационно-экологическая оценка потенциальной радоноопасности территории г. Тюмени и его окрестностей. Материалы и методы: Исследования выполнены с мая по август 2025 г., площадь территории составляла 697 км². Измерение плотности потока радона с поверхности грунта выполнено с помощью радиометра «Альфарад плюс-Р» (Россия) в 513 контрольных точках. Одновременно в местах измерения проводилось определение метеорологических параметров (температура и влажность воздуха, атмосферное давление) и измерение физических свойств грунта (температура, плотность и полевая влажность). Создание картографического материала выполнено в геоинформационной системе QGIS. Результаты исследования и обсуждение: Плотность потока радона с поверхности грунта находится в диапазоне от 20 до 730 мБк/(с·м²). Увеличение температуры и уменьшение влажности воздуха усиливает естественную эрозию верхних горизонтов, образуя трещины и изменяя плотность, из-за чего в таких местах значения плотности потока радона с поверхности грунта возрастают. Заключение: Выделенные границы аномалий с высокими значениями плотности потока радона с поверхности грунта могут быть использованы в градостроительном планировании при строительстве, ремонте, реконструкции зданий и сооружений с целью обеспечения радиационной безопасности населения, а также органами исполнительной власти, частными фирмами в сфере инженерных изысканий и экологического мониторинга.

Ключевые слова: радон-222, плотность потока радона, Тюмень, радоноопасность.

Введение

Как известно, природные источники ионизирующего излучения являются основным фактором, определяющим дозовую нагрузку на население. Особую роль среди природных радионуклидов занимает радон и его дочерние продукты распада, которые формируют от 50 до 90 % от общей дозы облучения. Радон — это радиоактивный газ естественного происхождения, не имеющий цвета, запаха и вкуса. Наиболее долгоживущим изотопом радона является радон-222 с периодом полураспада 3,8 суток, образующийся в радиоактивном ряду урана-238 — радия-226 [1].

Радиоактивный распад радона-222 (далее – радон) сопровождается альфа-излучением, обладающим ограниченной проникающей способностью в веществе и высокой линейной плотностью ионизации. Длительное воздействие даже низких объемных активностей радона значительно повышает риск развития рака легкого. Международное агентство по изучению рака (IARC) классифицирует радон как канцероген 1 группы для человека [2]. Облучение населения радоном происходит за счет его эманирования из горных пород, грунтов, строительных

материалов стен зданий и сооружений, а также воды в атмосферный воздух. Увеличение объемной активности радона в грунтах характерно для зон активных разрывных нарушений земной коры и на участках с повышенным содержанием радионуклидов уранового ряда. Особую опасность для человека представляют закрытые, плохо вентилируемые помещения жилых, общественных и производственных зданий и сооружений, где возможно накопление радона до уровней, превышающих гигиенические нормативы [3, 4].

Основными видами радиоэкологических исследований радона в объектах окружающей среды являются измерения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона в воздухе эксплуатируемых и вводимых в эксплуатацию зданий и сооружений, а также плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта, характеризующей потенциальную радоноопасность земельных участков, которые в зависимости от поставленных задач используются на этапе проектирования, строительства, эксплуатации, капитального ремонта и реконструкции зданий и сооружений. Результаты измерений указанных величин используются для оценки соответствия зданий, сооружений и земельных участков действующим санитарно-эпидемиологическим требованиям согласно

Гурьев Никита Евгеньевич

Тюменский Государственный Университет

Адрес для переписки: 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6; E-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru

НРБ-99/2009¹, СанПиН 2.6.4115-25² и ОСПОРБ 99/2010³.

ППР с поверхности грунта характеризуется значительной изменчивостью. Это обусловлено геологическим строением, содержанием материнского радионуклида (радия-226) в горных породах, метеорологическими параметрами территории, а также ландшафтными условиями в целом. Так, например, диапазон ППР с поверхности грунта г. Сах-дол (Индия) варьировался в интервале от 1–9 мБк/(с·м²), а на востоке Испании от 11 до 25 мБк/(с·м²), средние значения в г. Чжухай (КНР) составляли 620 мБк/(с·м²), а г. Эшасьер (Франция) – 95 мБк/(с·м²) [5–8]. На территории Российской Федерации коллективом авторов [9] выполнены исследования на пяти площадках в Московской, Рязанской, Свердловской, Иркутской областях и Ставропольском крае, где по результатам измерений ППР с поверхности грунта на некоторых участках значения превышали 1000 мБк/(с·м²).

Одним из возможных индикаторов потенциальной радиоопасности земельных участков, связанной с высокими показателями ППР с поверхности грунта, являются показатели ЭРОА радона в воздухе помещений зданий и сооружений. В границах г. Тюмени по данным санитарно-эпидемиологических исследований ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Тюменской области» в 2024 г. зафиксированных случаев высоких значений ЭРОА радона в воздухе помещений зданий и сооружений выявлено не было [10]. Однако в многочисленных работах [4, 11] были зафиксированы значения ЭРОА радона в воздухе зданий и сооружений больше 300 Бк/м³, а в отдельных районах города — свыше 600 Бк/м³.

Цель исследования – радиационно-экологическая оценка потенциальной радиоопасности территории г. Тюмени и его окрестностей.

Задачи исследования

1. Выполнить измерения и картографически отобразить результаты пространственной вариации ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей.
2. Выявить зоны повышенных и фоновых значений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей.
3. Определить влияние метеорологических параметров, физических свойств грунтов на территории г. Тюмени и окрестностей на значения ППР с поверхности грунта.

Материалы и методы

Исследуемая территория охватывает муниципальное образование город Тюмень, в состав которого входит четыре административных округа: Центральный, Ленинский, Калининский, Восточный (далее — ЦАО, ЛАО, КАО, ВАО соответственно), с общей площадью на 2025 г. — 697 км², а также прилегающие к городу территории: с. Луговое, п. Утешевский, п. Московский, д. Падерина, д. Дударева, д. Патрушева, пгт Боровский, д. Паренкина, с. Ембаево, д. Тураева, с. Яр, д. Решетникова, п. Андреевский. По схеме физико-географического районирования Тюменской области, территории исследования относятся к Тавдинской провинции, Туринской подпровинции, лесной равнинной широтно-зональной области. Климат близок к резко континентальному, для которого характерна холодная, продолжительная зима, короткое и теплое лето, а также резкие колебания температуры в течение года [11–13]. В таблице 1 представлены метеорологические условия в период проведения работ по данным метеостанции г. Тюмени.

Таблица 1. Метеорологические условия на территории работ в период исследования (май – август 2025 г.)

[Table 1. Meteorological conditions in the work area during the study period (May – August 2025)]

Параметр [Parameter]	Макс. [Max.]	Мин. [Min.]	Среднее [Mean]
Температура, °C [Temperature, °C]	+ 40	+ 10	+ 24
Относительная влажность, % [Relative humidity, %]	94	19	55
Атмосферное давление, мм рт.ст. [Air pressure, mmHg]	758	731	749

Участок работ относится к денудационно-аккумулятивной поверхности долины р. Туры. Абсолютные отметки поверхности земли варьируются в интервале от 50 до 120 м (абсолютные отметки приведены в Балтийской системе высот) [14]. Почвенный покров территории исследования по классификации О.З. Еремченко [15] можно отнести к естественным ненарушенным, антропогенно поверхностно преобразованным и антропогенно глубоко преобразованным почвам.

¹Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

²Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения: Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.6.4115-25. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27.03.2025 № 6 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 21.04.2025, регистрационный № 81916). [Sanitary and epidemiological requirements in the field of radiation safety of the population when handling ionizing radiation sources. Sanitary and epidemiological rules and norms SanPiN 2.6.4115-25. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 27.03.2025 No. 6 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 21.04.2025, registration No. 81916). (In Russ.)]

³Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 11.08.2010, registration No. 18115). (In Russ.)]

Работа выполнена в период с мая по август 2025 г. в 3 этапа. На первом этапе (подготовительный) определены методы работы, в программе «SAS.Планета»⁴ с шагом 1 км в границах города, а также в ближайших окрестностях нанесены контрольные точки мест измерений ППР с поверхности грунта (рис. 1). В случаях непригодности (асфальтное покрытие) для измерения контрольная точка смещалась на незначительное расстояние от исходного положения. Если контрольная точка находилась в границах военного объекта

или стратегического предприятия, использовался метод интерполяции по ближайшим точкам. Площадь исследуемой территории составляла 697 км², из них 190 км² — во внутренней границе «ТКАД» (Тюменская кольцевая автомобильная дорога) и 317 км² — в его внешней границе, включая населенные пункты, которые согласно генеральному плану городского округа г. Тюмени на 2024 г.⁵ в перспективе могут войти в состав города.

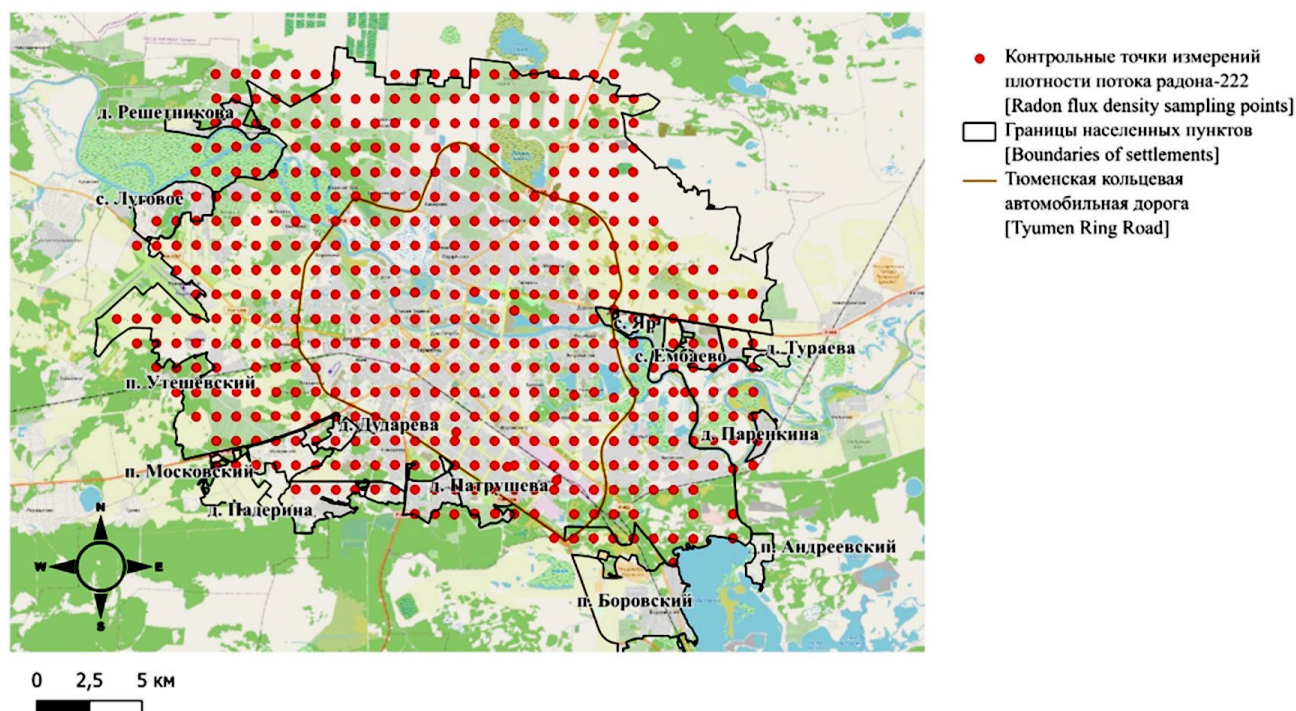


Рис. 1. Карта-схема расположения контрольных точек измерения ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей (масштаб 1:400000)

[Fig. 1. Map of the location of radon flux density sampling points from the subsoil on the territory of Tyumen and its environs (scale of 1:400000)]

На втором этапе выполнены полевые работы, в состав которых входило: измерение ППР с поверхности грунта, метеорологических параметров (температура и влажность воздуха, атмосферное давление), плотности и температуры грунта. Ориентация на местности выполнена с помощью GPS-навигатора «Garmin». Измерения ППР с поверхности грунта проведены при помощи радиометра «Альфард плюс-Р» (Россия), предназначенного для экспрессных измерений и непрерывного мониторинга радона-222 в атмосферном воздухе, почве, воде. Работы выполнялись в период стабильных метеорологических параметров, без атмосферных осадков, с 10:00 до 17:00 по местному времени.

В случаях, когда температура воздуха была выше +35 °С и не соответствовала техническим параметрам прибора, выполнялся отбор проб с последующим анализом в лаборатории радиационной экологии Школы естественных наук ФГАО ВО «Тюменского государственного университета». Измерения выполнены в 513 контрольных точках, в каждой точке проведено три измерения. В контрольных точках измерений осуществлена подготовка участка размером 0,2×0,2 м, включающая в себя зачистку территории от мусора, растительности, крупных камней и рыхление на глубину 0,05 м. Измерения проводились через 20 минут после подготовки участка. Длительность измерений составляла 20 минут.

⁴SAS.Планета: версия 200606 (06.06.2020) / SASGIS. URL: <https://www.sasgis.org/sasplaneta/?ysclid=mlmlra3uv4133187246> (дата обращения: 14.02.2026). [SAS. Planet. Version 200606 (06.06.2020) / SASGIS. Available from: <https://www.sasgis.org/sasplaneta/?ysclid=mlmlra3uv4133187246> [Accessed 14 Feb 2026]. (In Russ..)]

⁵Тюменская городская Дума. Решение от 27.06.2024 № 105 «О внесении изменений в Генеральный план городского округа город Тюмень, утвержденный решением Тюменской городской Думы от 27.03.2008 № 9». Тюмень, 2024. URL: <https://www.tyumen-city.ru/vlast/administracii/struktura-administracii-goroda-tumeni/departaments/dzr/napravlenie-deitelnosti/departamentgradostroitelnoipolitiki/genplan/> (дата обращения: 14.02.2026). [Tyumen City Duma. Decision of 27.06.2024 No. 105 "On Amendments to the General Plan of the City District of Tyumen, approved by the decision of the Tyumen City Duma of 27.03.2008 No. 9". Tyumen; 2024. Available from: <https://www.tyumen-city.ru/vlast/administracii/struktura-administracii-goroda-tumeni/departaments/dzr/napravlenie-deitelnosti/departamentgradostroitelnoipolitiki/genplan/> [Accessed 14 Feb 2026]. (In Russ..)]

Одновременно с измерением ППР с поверхности грунта выполнены работы по определению метеорологических условий (температура и влажность воздуха, атмосферное давление), физических параметров грунтов (плотность, температура и влажность). Измерение метеорологических условий выполнено с помощью прибора «Метеоскоп-М+» (Россия). Измерение температуры грунта выполнялось с помощью электронного термометра «ТР101». Определение плотности влажного грунта проводилось по методу режущего кольца согласно ГОСТ 5180-2015⁶ стальным пробоотборником ПГ-100 объемом 100 см³.

Заключительным этапом работ являлась обработка полученных результатов исследования. Выполнено сравнение полученных значений с гигиеническим нормативом, установленным в ОСПОРБ 99/2010. Создание картографического материала выполнено в геоинформационной системе QGIS⁷ методом интерполяции обратно-взвешенного расстояния.

Результаты исследования

Полученные данные свидетельствуют о высокой вариативности ППР с поверхности грунта в диапазоне от 20

до 730 мБк/(с·м²), при этом среднее арифметическое значение составило 126 мБк/(с·м²), медиана – 73 мБк/(с·м²), геометрическое среднее – 86 мБк/(с·м²), геометрическое стандартное отклонение (GSD) – 2,32. Стандартное отклонение (SD = 124 мБк/(с·м²)) подтверждает значительную дисперсию данных. Среднее арифметическое значение ППР с поверхности грунта в КАО составляет 170 мБк/(с·м²), а в ЦАО – 144 мБк/(с·м²). При этом в ЛАО и ВАО значения оказались существенно ниже и находятся в интервале от 54 до 64 мБк/(с·м²) соответственно. Для окрестностей г. Тюмени характерно неоднородное по площади распределение ППР с поверхности грунта, при этом максимальные значения приурочены к населенным пунктам, расположенным севернее, западнее и южнее городской агломерации. Так, средние арифметические значения в п. Московский, Падерина, с. Луговом, д. Решеникова, Патрушева составляют 456, 421, 218, 187 и 83 мБк/(с·м²) соответственно. В с. Ембаево, Яр и д. Паренкина, расположенных восточнее г. Тюмени, значения составляют 106, 42 и 52 мБк/(с·м²) соответственно. Результаты статистической обработки значений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты статистической обработки результатов измерений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей

[Table 2. Results of statistical processing of measurement results of radon flux density from the subsoil surface in the city of Tyumen and its surroundings]

Участок [Region]	Диапазон результатов, мБк/(с·м ²) [Range of results, mBq/(s·m ²)]	Среднее арифметическое, мБк/(с·м ²) [Arithmetic mean, mBq/(s·m ²)]	Стандартное отклонение, мБк/(с·м ²) [SD, mBq/(s·m ²)]	Медиана, мБк/(с·м ²) [Median, mBq/(s·m ²)]	СГО [GSD]
г. Тюмень [city of Tyumen]					
КАО [Kalininsky Administrative District]	20–730	170	132	137	2,33
ВАО [Eastern Administrative District]	26–285	64	43	55	1,59
ЦАО [Central Administrative District]	20–469	144	116	98	2,25
ЛАО [Leninsky Administrative District]	20–252	54	30	49	1,57
Окрестности г. Тюмени [Surroundings of Tyumen]					
Северная [Northern]	20–615	158	159	146	2,53
Южная [Southern]	27–730	249	201	184	2,57
Западная [Western]	20–399	141	113	97	2,35
Восточная [Eastern]	27–319	81	78	57	1,93

⁶ГОСТ 5180–2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Введен в действие приказом Росстандарта от 03.11.2015 № 1694-ст. [Interstate Standard GOST 5180–2015 “Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics”. Put into effect by the order of Rosstandart of 03.11.2015 No. 1694-st. (In Russ.)]

⁷QGIS: Географическая информационная система / Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Версия 3.44.6 (2025-02-21). URL: <https://qgis.org/> (дата обращения: 14.02.2026). [QGIS. Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Version 3.44.6 (2025-02-21). Available from: <https://qgis.org/> [Accessed 14 Feb 2026]. (In Russ.)]

Обсуждение

Вариативность значений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей ставит серьезную задачу по определению исходных причин высоких значений. Причинами появления зон ППР с поверхности грунта со значениями выше $80 \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, по данным отечественных ученых [16, 17], являются участки близкого залегания урановых минералов, которые формируют высокий природный радиационный фон местности, а также разломные и геодинамически активные зоны земной коры.

По данным ежегодных докладов [10], а также исследований [18, 19] среднее значение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения составляет $0,18 \text{ мкЗв}/\text{ч}$, а средняя удельная активность радия-226 в поверхностном слое грунтов территории г. Тюмени и его окрестностей – $16 \text{ Бк}/\text{кг}$, что по данным НКДАР ООН за 2024 г. в 2 раза ниже среднемирового уровня [20].

Возможная причина неравномерного распределения ППР с поверхности грунта связана не со степенью антропогенного изменения ландшафта (полученные высокие значения (свыше $80 \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$) обнаружены как на условно фоновых (естественных), не затронутых антропогенной деятельностью ландшафтах, так и на антропогенно измененных тер-

риториях), а возможно с геологическим строением территории. С геологической точки зрения четвертичные отложения территории г. Тюмени и его окрестностей разделены р. Турой на южную и северную части. В южной части города территория сложена преимущественно аллювием надпойменных террас и поймы р. Туры. Северная часть города представлена пойменными, элювиальными и делювиальными отложениями. С учетом относительной однородности геологического строения рыхлых осадочных отложений территории, можно предположить, что причиной значений ППР с поверхности грунта выше $80 \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ в северной, западной и южной частях г. Тюмени и его окрестностей могут являться более глубокие слои земной коры. Так, согласно государственной геологической карте Российской Федерации (доюрские образования Уральской серии, масштаб 1:1000000, 2009 г.), территория г. Тюмени и его окрестностей характеризуется сложным тектоническим строением, включающим наличие древних погребенных разломов (Ливановский и Тюменско-Чудиновский), а также нарушениями в земной коре. На основе имеющейся информации о тектоническом строении территории работ, а также полученных результатов радоновой съемки была составлена первая крупномасштабная карта ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей (рис. 2).

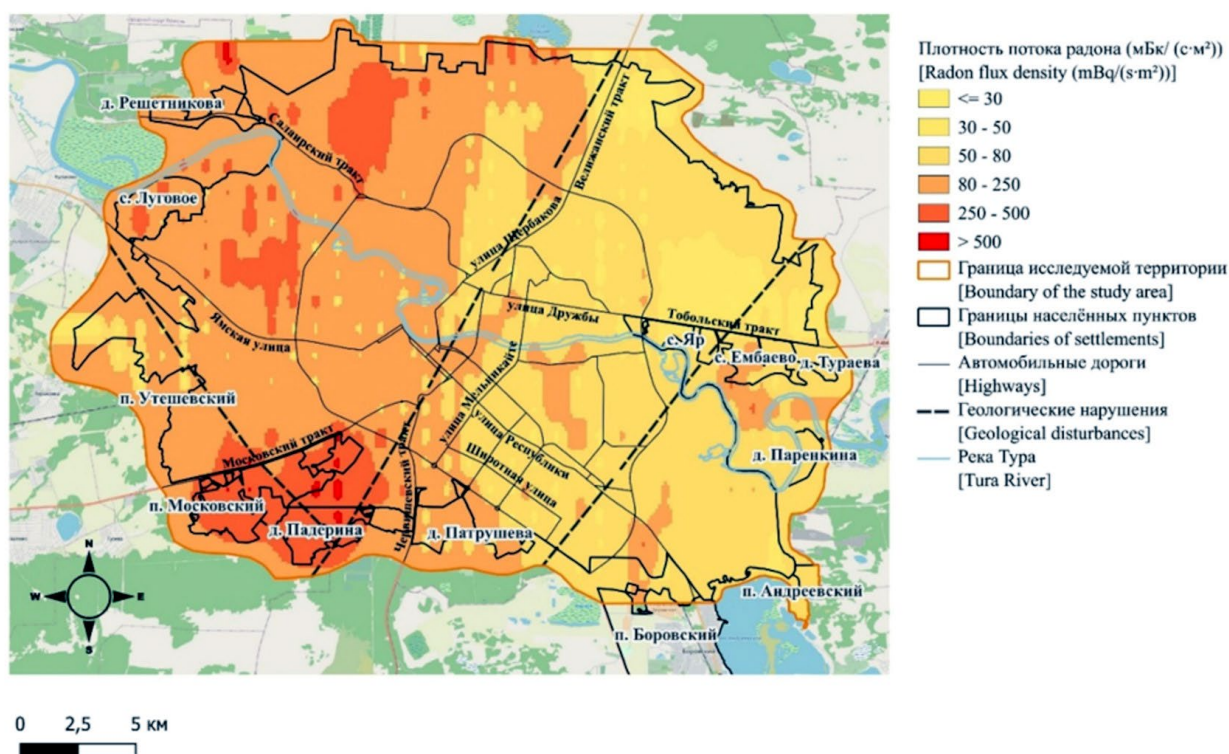


Рис. 2. Карта-схема ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей (масштаб 1:350000)
[Fig. 2. Map of the radon flux density from the subsoil on the territory of Tyumen and its environs (scale 1:350000)]

Выявленные высокие значения ППР с поверхности грунта, по-видимому, не имеют хаотичного характера пространственного размещения, а, возможно, приурочены к узлам пересечения разрывных нарушений и трещинам в земной коре (рис. 2). Высокие значения ППР с поверхности грунта (выше $80 \text{ мБк}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$) в границах города обнаружены в ЦАО, КАО и частично ВАО, а в окрестностях г. Тюмени –

в северной (д. Решетникова), западной (с. Луговое и п. Утешевский) и южной (п. Московский, д. Падерина, д. Патрушева) частях, граничащих с указанными административными округами. Для территории ЛАО и восточных окраин (с. Яр, д. Паренкина, д. Тураева, п. Андреевский), за исключением д. Боровский и с. Ембаево, характерно относительно низкое значение ППР с поверхности грунта.

В работах отечественных ученых [16, 17, 21] неоднократно упоминается связь высоких значений ППР с поверхностью грунта с разломами земной коры, которые служат путями миграции радона из глубоких слоев к поверхности, что приводит к образованию локальных радоновых аномалий, обусловленных увеличенной эксхалацией радона в образованных трещинах и пустотах в местах нарушений. Однако механизм его поступления на поверхность земли все еще остается предметом дискуссий в научном сообществе.

Авторы работы предполагают, что возможной причиной появления зон высоких значений ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей являются особенности геологического строения и гидрогеологической стратификации территории. Гидрогеологические условия территории исследования характеризуются сложным строением залегания напорных подземных вод, которые относятся к Западно-Сибирскому мегабассейну. Появление зон с высокими значениями ППР с поверхности грунта может происходить за счет переноса радона из глубинных слоев напорными термальными подземными водами при конвективном переносе.

Неравномерное распределение плотности, гранулометрического состава отложений и гидростатического давления из-за зон нагрева отложений термальными водами и их охлаждения на отдельных участках может создавать подъемную силу, где в местах трещин, макропор и пустот происходит увеличение значений ППР с поверхности грунта.

Перенос радона из глубинных слоев земной коры в верхний поверхностный слой грунта, а также его последующая эксхалация в атмосферу представляют собой сложные процессы, подверженные влиянию множества взаимосвязанных факторов. В таблице 3 представлены результаты анализа связи ППР с поверхности грунта с метеорологическими параметрами и физическими свойствами грунтов. Для анализа использовались результаты измерений температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, плотности, температуры и влажности грунтов. Коэффициенты корреляции оценивались следующим образом: менее 0,3 – слабая связь, от 0,3 до 0,5 – умеренная, от 0,5 до 0,7 – значительная, от 0,7 до 0,9 – сильная и более 0,9 – очень сильная.

Таблица 3. Характер взаимодействия ППР с поверхности грунта с метеорологическими параметрами и физическими свойствами грунтов

[Table 3. The interaction of radon flux density from the subsoil with meteorological parameters and physical properties of subsoil]

Параметр [Parameter]	Коэффициент корреляции [Correlation coefficient]	p-значение [p-value]
Метеорологические параметры [Meteorological parameters]		
Температура воздуха, °C [Air temperature, °C]	$r = 0,65$	$< 0,001$
Атмосферное давление, мм рт. ст. [Atmospheric pressure, mmHg]	$r = 0,21$	$< 0,001$
Влажность воздуха, % [Air humidity, %]	$r = -0,61$	$< 0,001$
Физические свойства грунтов [Physical properties of subsoil]		
Температура грунта, °C [Subsoil temperature, °C]	$r = 0,67$	$< 0,001$
Плотность грунта, г / см ³ [Subsoil density, g/cm ³]	$r = -0,69$	$< 0,001$
Полевая влажность грунта, % [Field subsoil moisture, %]	$r = -0,61$	0,475

Причина изменений значений ППР в верхнем поверхностном слое грунта на территории исследования связана с процессами воздухообмена между грунтом и приземной частью атмосферы в результате конвекции. Проведенный анализ выявил различную степень взаимосвязи ППР с поверхности грунта с метеорологическими параметрами и физическими свойствами грунтов. Процессы воздухообмена между средами происходят за счет наличия в грунте макропор и трещин, образованных в результате физической эрозии, а также деятельности живых организмов. Увеличение температуры и уменьшение влажности воздуха приводят к постепенному уменьшению количества грунтовой влаги и увеличению плотности верхних слоев грунта. В плотных верхних горизонтах грунта тяжелосуглинистого и глинистого гранулометрического состава образуются микротрещины и пустоты из-за их естественной физической эрозии. В городских ландшафтах газопроницаемость грунта, от которой зависят значения ППР с поверхности грунта, может изменяться. Механические воздействия на грунты приводит к их переуплотнению, в результате чего разрушаются макро-

поры, это снижает газопроницаемость грунтов и, как следствие, уменьшает значения ППР в поверхностной части [9].

Заключение

На данный момент авторами выполнена первая крупномасштабная съемка ППР с поверхности грунта на территории г. Тюмени и его окрестностей с целью определения потенциально радоноопасных территорий, выделены границы аномалий с высокими значениями ППР с поверхности грунта. Полученные результаты могут быть использованы в градостроительном планировании при строительстве, ремонте, реконструкции зданий и сооружений с целью обеспечения радиационной безопасности населения, а также органами исполнительной власти (администрация г. Тюмени, департамент недропользования и экологии Тюменской области, департамент городского хозяйства г. Тюмени, Управлением Роспотребнадзора по Тюменской области и др.), частными фирмами в сфере инженерных изысканий и экологического мониторинга.

В ходе исследования были решены все поставленные задачи:

1. Выполнена первая крупномасштабная радоновая съемка территории г. Тюмени и его окрестностей с последующим картографированием полученных результатов с выделением зон низких и высоких значений ППР с поверхности грунта.

2. Анализ данных показал, что 29 и 14 % полученных значений превышают 80 и 250 мБк/(с·м²) соответственно. Высокие значения ППР с поверхности грунта обнаружены в границах г. Тюмени в КАО, ЦАО, ВАО, а в окрестностях городской агломерации – в северных, западных и южных частях. Территории ЛАО, а также восточные окраины характеризуются относительно низкими значениями ППР с поверхности грунта с локальными участками в юго-восточном направлении выше 80 мБк/(с·м²).

3. Наибольшее влияние среди метеорологических параметров на показатель ППР с поверхности грунта оказывают температура и влажность воздуха, а также физические свойства грунта (температура, влажность и плотность). Под воздействием солнечных лучей, из-за продолжительных высоких температур воздуха, происходит испарение грунтовой влаги и ее уплотнение. В результате в поверхностном слое грунта появляются трещины и микропоры, происходит естественная физическая эрозия, из-за чего значения ППР с поверхности грунта могут увеличиваться.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Благодарности

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations, 2000. 76 p.
- IARC. Man-made fibres and radon. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, Volume 43. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 1988. 309 p.
- Araújo da Costa Xavier L., Navoni J., Souza do Amaral V. Oxidative genomic damage in humans exposed to high indoor radon levels in Northeast Brazil // Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. 2023. Vol. 889. Art. 503652. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2023.503652.
- Гузеева С.А., Митриковский А.Я. Особенности накопления радона в воздухе жилых помещений // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 2. С. 34–42.
- Zhuo W., Guo Q., Chen B., Cheng G. Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China // Journal of Environmental Radioactivity. 2008. Vol. 99, No 7. P. 1143–1148. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.01.011.
- Lei B., Zhao L., Girault F. et al. Overview and large-scale representative estimate of radon-222 flux data in China // Environmental Advances. 2023. Vol. 11. Art. 100312. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100312.
- Malik G., Parkash R., Bhutani M. et al. Radon and Thoron exhalation rates in soil near coal mines in Shahdol, Madhya Pradesh // Applied Radiation and Isotopes. 2025. Vol. 225. Art. 111994. DOI: 10.1016/j.apradiso.2025.111994.
- Grossi C., Vargas A., Camacho A. et al. Inter-comparison of different direct and indirect methods to determine radon flux from soil // Radiation Measurements. 2011. Vol. 46, No. 1. P. 112–118. DOI: 10.1016/j.radmeas.2010.07.021.
- Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.
- Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2024 году. Тюмень: Департамент недропользования и экологии Тюменской области, 2025. 168 с.
- Гусейнов А.Н. Экология города Тюмени: состояние, проблемы. Тюмень: Изд. фирма «Слово», 2001. 176 с.
- Иваненко А.С. Окрестности Тюмени. Свердловск: Средне-Уральское книжное изд-во, 1988. 205 с.
- Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. М.: Изд-во Московского университета, 1973. 246 с.
- Старков В.Д., Тюлькова Л.А. Геология, рельеф, полезные ископаемые Тюменской области. Тюмень: Тюменский дом печати, 2010. 352 с.
- Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2016. 252 с.
- Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С. Радоновая и тектоническая активность разломов земной коры (на примере Центральной Монголии) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 2. С. 243–255. DOI: 10.15372/GiG2019016.
- Удортин В.В., Езимова Ю.Е., Магомедова А.Ш. Радоновая съемка для картирования разломных зон Тимано-Североуральского региона. Сыктывкар: Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 2021. 150 с. DOI: 10.19110/89606-020.
- Гурьев Н.Е., Клименко В.В. Комплексное радиационно-экологическое исследование города Тюмени // Социально-экологические технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 278–291. DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-278-291.
- Синдирева А.В., Гурьев Н.Е., Венедиктова Ю.В., Абдуллин А.Ф. Радиационно-экологическая оценка оврага реки Тюменка в г. Тюмени // Социально-экологические технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 472–495. DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-4-472-495.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2024 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. II. Scientific Annex B: Evaluation of public exposure to ionizing radiation. New York: United Nations, 2025. 270 p.
- Микляев П.С., Петрова Т.Б., Климшин А.В. и др. Радоновые аномалии в зонах активных разломов. Сб. докл. и тез. науч.-практ. конф. «Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики», Москва, 30–31 марта 2023. М., 2023. С. 51–56.

Поступила: 06.01.2026

Гурьев Никита Евгеньевич – старший преподаватель кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук, Тюменский Государственный Университет. **Адрес для переписки:** 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6. E-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru; ORCID: 0009-0004-0602-1969, РИНЦ Author ID: 1228252

Зонова Екатерина Олеговна – студент кафедры геоэкологии и природопользования Школы естественных наук, Тюменский Государственный Университет, Тюмень, Россия; ORCID: 0009-0007-9652-1693, РИНЦ Author ID: 1341650

Для цитирования: Гурьев Н.Е., Зонова Е.О. Пространственное распределение плотности потока радона с поверхности грунта на территории города Тюмени и его окрестностей // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 115–123. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-115-123

Spatial distribution of radon flux density from subsoil surface on the territory of Tyumen and its surroundings

Nikita E. Guryev, Ekaterina O. Zonova

Tyumen State University, Tyumen, Russia

A special role among natural radionuclides is occupied by radon and its short-lived daughter decay products, which form from 50 to 90 % of the total radiation dose of the population. A danger to a person is represented by closed poorly ventilated rooms in which radon can accumulate in excess of the established hygienic standard. One of the factors for the accumulation of radon in buildings and structures is its emanation from rocks and subsoil. The method of measuring the radon flux density from the subsoil surface is used to assess the potential radon hazard of the land plot intended for the construction of buildings and structures. The purpose of the study is radiation and environmental assessment of the potential radon hazard of the territory of Tyumen and its surroundings. Materials and Methods: The studies were carried out from May to August 2025; the area covered was 697 km². The measurement of the radon flux density from the soil surface was performed using the AlphaRad Plus-R radiometer (Russia) at 513 control points. At the same time, meteorological parameters (air temperature and humidity, atmospheric pressure) were measured at the measurement sites; the physical properties of the soil (temperature, density, and field moisture) were also measured. The mapping data was created using the QGIS geoinformation system. Results and Discussion: The radon flux density from the soil surface ranges from 20 to 730 mBq/(s·m²). An increase in temperature and a decrease in air humidity intensify the natural erosion of the upper layers, causing cracks and changes in density, resulting in higher radon flux densities from the soil surface in these areas. Conclusion: The identified boundaries of anomalies with high values of radon flux density from the soil surface can be used: 1) in urban planning during the construction, repair, and reconstruction of buildings and structures in order to ensure radiation safety of the population; 2) in the field of engineering surveys and environmental monitoring by executive authorities and private firms.

Key words: radon-222, radon flux density, Tyumen; radon hazard.

Authors' personal contribution

All authors contributed equally to the preparation of this publication.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to anonymous reviewers for the work done.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2000. 76 p.
2. IARC. Man-made fibres and radon. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, Volume 43. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 1988. 309 p.
3. Araújo da Costa Xavier L, Navoni J, Souza do Amaral V. Oxidative genomic damage in humans exposed to high indoor radon levels in Northeast Brazil. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2023;889: 503652. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2023.503652.
4. Guzeva SA, Mitrikovskij AJa. Particular features of radon accumulation in the air of residential premises. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*. 2019;2: 34–42. (In Russian).

Nikita E. Guryev

Tyumen State University

Address for correspondence: 6, Volodarsky Str., Tyumen, 625033, Russia; E-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru

5. Zhuo W, Guo Q, Chen B, Cheng G. Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008;99(7): 1143–1148. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.01.011.
6. Lei B, Zhao L, Girault F, Cai Z, Luo C, Thapa S, et al. Overview and large-scale representative estimate of radon-222 flux data in China. *Environmental Advances*. 2023;11: 100312. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100312.
7. Malik G, Parkash R, Bhutani M, Hooda B, Panghal A, Malik P, et al. Radon and Thoron exhalation rates in soil near coal mines in Shahdol, Madhya Pradesh. *Applied Radiation and Isotopes*. 2025;225: 111994. DOI: 10.1016/j.apradiso.2025.111994.
8. Grossi C, Vargas A, Camacho A, López-Coto I, Bolívar J, Xia Y, et al. Inter-comparison of different direct and indirect methods to determine radon flux from soil. *Radiation Measurements*. 2011;46(1): 112–118. DOI: 10.1016/j.radmeas.2010.07.021.
9. Marennyy AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB. Patterns of Radon Field Formation in the Geological Environment. Moscow: Pero; 2016. 394 p. (In Russian).
10. Report on the environmental situation in the Tyumen region in 2024. Tyumen: Department of Subsoil Use and Ecology of the Tyumen Region; 2025. 168 p. (In Russian).
11. Guseynov AN. Ecology of the city of Tyumen: status and problems. Tyumen: Slovo Publishing House; 2001. 176 p. (In Russian).
12. Ivanenko AS. The environs of Tyumen. Sverdlovsk: Central Ural Publishing House; 1988. 205 p. (In Russian).
13. Gvozdetsky NA. Physical-geographical zoning of the Tyumen Region. Moscow: Moscow University Press; 1973. 246 p. (In Russian).
14. Starkov VD, Tyulkova LA. Geology, relief, minerals of the Tyumen region. Tyumen: Tyumensky Dom Pechati; 2010. 352 p. (In Russian).
15. Eremchenko OZ, Shestakov IE, Moskvina NV. Soils and anthropogenic surface formations in urbanized areas of the Perm Cis-Urals. Perm: Perm State National Research University; 2016. 252 p. (In Russian).
16. Seminsky KZh, Bobrov AA, Demberel S. Radon and tectonic activities of crustal faults: the case of Central Mongolia. *Geologija i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2019;60(2): 243–255. (In Russian) DOI: 10.15372/GiG2019016.
17. Udoratin VV, Ezimova JuE, Magomedova AS. Radon survey for mapping fault zones of the Timan-Severouralsk region. Syktyvkar: Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021. 150 p. (In Russian). DOI: 10.19110/89606-020
18. Guryev NE, Klimenko VV. Comprehensive radiation and ecological study of the city of Tyumen. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii = Social and Ecological Technologies*. 2023;13(3): 278–291. (In Russian) DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-278-291.
19. Sindireva AV, Guryev NE, Venediktova JuV, Abdullin AF. Radiation-ecological assessment of the ravine of the Tyumenka River, Tyumen. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii = Social and Ecological Technologies*. 2024;14(4): 472–495. (In Russian) DOI: 10.31862/2500-2961-2024-14-4-472-495.
20. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2024 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. II. Scientific Annex B: Evaluation of public exposure to ionizing radiation. New York: United Nations; 2025. 270 p.
21. Miklyaev PS, Petrova TB, Klimshin AV, Shhitov DV, Sidiyakin PA, Gavriliev SG. Radon anomalies in active fault zones. Sergeyevsky readings. Fundamental and applied issues of engineering geodynamics: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology, Moscow, 30–31 March 2023. Moscow: GeoInfo; 2023. P. 51–56. (In Russian).

Received: January 06, 2026

For correspondence: Nikita E. Guryev – Senior Lecturer at the Department of Geoecology and Environmental Management of the School of Natural Sciences, Tyumen State University (6, Volodarsky Str., Tyumen, 625033, Russia; E-mail: nikitka.gurev.1996@mail.ru); ORCID: 0009-0004-0602-1969, RSCI Author ID: 1228252

Ekaterina O. Zonova – Student at the Department of Geoecology and Environmental Management of the School of Natural Sciences, Tyumen State University, Tyumen, Russia; ORCID: 0009-0007-9652-1693, RSCI Author ID: 1341650

For citation: Guryev N.E., Zonova E.O. Spatial distribution of radon flux density from subsoil surface on the territory of Tyumen and its surroundings. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 115–123. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-115-123