

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.35:614.876

АНОМАЛИИ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА  
НА ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ

© 2017 г. П. С. Микляев\*, Т. Б. Петрова\*\*,  
В. М. Макеев\*, А. В. Климшин\*\*\*

\*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, Москва, 101000 Россия.

E-mail: peterm7@inbox.ru, vmakeev@mail.ru

\*\*МГУ им. М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра радиохимии,  
Ленинские горы, 1, корп. 10, Москва, 119991 Россия.

E-mail: alpinzayac@mail.ru

\*\*\*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,  
ул. Амундсена, 100, Екатеринбург, 620016 Россия.

E-mail: aklimshin@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.11.2016 г.

В работе приведен анализ распределения во времени аномалий плотности потока радона (ППР), выявленных в Москве по результатам массовых практически ежедневных исследований потенциальной радоноопасности участков строительства в период с 2002 по 2007 год. Аномалии представляют собой отдельные точки измерения, в которых ППР превышает 1000 мБк/м<sup>2</sup>с. Выявлены периоды наиболее частого проявления аномалий ППР, повторяющиеся каждые 14–16 месяцев, что соответствует периодам нутации оси вращения Земли. Кроме того, аномалии ППР в Москве в целом совпадают по времени с наиболее сильными землетрясениями, эпицентры которых удалены от исследуемой территории на тысячи километров. Наблюдаемые явления могут быть объяснены распространением в литосфере сверхдлинных деформационных волн, возникающих на границе внешнего ядра и мантии и одновременно достигающих зон концентрации тектонических напряжений: активных разломов в сейсмоактивных областях и геодинамически активных зон на платформах. В первом случае деформационные волны инициируют сильные землетрясения, а во втором – относительно слабые деформационные процессы, сопровождающиеся аномалиями ППР. Гипотеза о распространении в литосфере подобных деформационных волн была выдвинута В.Е. Хаиным. Зафиксированные аномалии ППР, возможно, связаны с глобальными геодинамическими процессами, протекающими в земной коре. Учитывая крайне высокие значения ППР на аномальных участках, их выявление и картирование – важнейшая задача при изучении потенциальной радоноопасности территорий.

**Ключевые слова:** радон, плотность потока радона, аномалии, деформационные процессы, геодинамика, геогенный радоновый потенциал, радиационно-экологические изыскания.

ВВЕДЕНИЕ

Облучение населения радоном в помещениях – одна из наиболее значимых современных экологических проблем. Результаты международных исследований воздействия радона на человека, опубликованные Научным комитетом по действию атомной радиации при ООН (НКДАР ООН), Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ), Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), а также Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), показывают, что радон – основной источник внутреннего облучения населения в мирное время, и выступает вторым после курения фактором риска

возникновения рака легкого [11, 12, 20]. По данным ВОЗ около 20% смертей от рака легкого в мире вызвано облучением радоном в помещениях. В последние годы ВОЗ объявила приоритетными меры, направленные на борьбу с ростом заболеваемости раком. В комплекс мер входят, как разработка новых методов оперативного и медикаментозного лечения рака, так и профилактика онкологических заболеваний, включающая в себя пропаганду здорового активного образа жизни, борьбу с курением, а также меры по снижению доз облучения человека радоном в помещениях [20]. В Евросоюзе, США, Канаде и др. странах (круг этих стран расширяется год от года) на уровне распорядительных органов

в полной мере осознана опасность облучения радоном в домах. В соответствии с рекомендациями НК-ДАР ООН, МАГАТЭ, МКРЗ, ВОЗ сформированы национальные планы действия по защите от радона, предусматривающие комплекс мероприятий, направленных на решение радоновой проблемы и рассчитанных на длительную перспективу (10–20 лет). В настоящее время идет активнейшая работа по составлению единой радоновой карты Европы. Причем специалисты в области радоновой проблемы во всем мире приходят к выводу о необходимости картирования не только, и не столько концентраций радона в зданиях, но, прежде всего, условий выделения радона из геологической среды [14]. Это связано с тем, что концентрация радона в помещениях зависит от многих случайных факторов, таких как конструктивные особенности зданий (режим вентиляции, тип строительных материалов, оконных рам и т.п.) и частотой проветривания помещений (открытая форточка, окно, дверь могут приводить к кратковременному снижению концентрации радона в помещении в разы). Проветривание помещения зависит как от его назначения, так и от такого слабо предсказуемого фактора, как привычки жителей. В результате концентрация радона в помещениях крайне нестабильная величина, изменяющаяся в широких пределах, и зависящая в частности от непредсказуемых “антропогенных” факторов [14].

В этой связи, в последнее время при оценках радиационного риска все большее внимание уделяется изучению и картографированию параметров геологической среды, обуславливающих поступление радона в здания, как более стабильных величин по сравнению с концентрациями радона в помещениях. В рамках Европейской радоновой программы раз в два года проводится семинар “Геологические аспекты картирования радонового риска” (GARRM), где ведущие специалисты регулярно обмениваются опытом. В результате, в Европе в настоящее время разрабатывается концепция “геогенного радонового потенциала” (geogenic radon potential), в основе которой лежит качественная и количественная оценка способности геологической среды к выделению радона [14]. В рамках данной концепции разработаны комплексные программы по изучению выделения радона из геологической среды. Установлено, что основной источник поступления и накопления радона в помещениях, где и происходит облучение людей, связан с его выделением непосредственно из грунтов основания (значительное выделение радона из строительных конструкций — достаточно редкий случай). Радон легко проникает из грунтов в здание через трещины в стяжке и стенах подвалов, водостоки, врезки коммуникаций, стыки между плитами и т.д., а в случае высокой

интенсивности поступления может накапливаться в помещениях в высоких концентрациях, в том числе превышающих установленные санитарные пределы. Особенно активно радон выделяется из геологической среды в зонах активных тектонических разломов в горно-складчатых сейсмически активных регионах [7, 10, 13, 16]. Однако в пределах платформенных территорий, относительно спокойных в сейсмическом и тектоническом отношении, также прослеживается четкая корреляция между наличием геодинамически активных зон и аномальными значениями параметров радонового поля [4, 6]. Исследованию закономерностей проявления радоновых аномалий в геодинамически активных зонах посвящена данная работа.

### ПРОБЛЕМА АНОМАЛЬНЫХ ПОТОКОВ РАДОНА В МОСКВЕ

Как было показано в наших предыдущих работах, обобщающих результаты массовых измерений плотности потока радона (ППР), выполненных на территории Москвы [6], в отдельных точках измерения зафиксированы аномально высокие значения ППР с поверхности грунта, в сотни раз превышающие фоновые. Данное явление названо нами “факельными выбросами” радона. Аномалии ППР — явление относительно редкое. На территории Москвы за период 2002–2007 гг. (обследовано более 900 участков строительства) аномалии ППР были зарегистрированы только на 52 участках. Вместе с тем для аномальных точек характерны крайне высокие значения ППР, достигающие 1000–5000 мБк/м<sup>2</sup>с (в отдельном случае до 10 000 мБк/м<sup>2</sup>с). Столь высокие значения ППР были зафиксированы только в районах, характеризующихся высокой сейсмической и тектонической активностью и наличием пород с аномально высоким содержанием радия-226, таких, например, как склоны г. Бештау (г. Лермонтов, Ставропольского края) или берег оз. Байкал (с. Большое Голоустное, Иркутской обл.) [5, 6]. Из литературных источников известно, что ППР от 1000 до 8000 мБк/м<sup>2</sup>с наблюдается на поверхности “хвостов” переработки урановых руд, содержание радия-226 в которых составляет 3000–10 000 Бк/кг [17, 19].

По результатам измерений проб, отобранных из скважин в ходе инженерно-экологических изысканий на площадках Москвы, где были зарегистрированы аномалии ППР, содержание радия-226 составляет 5–50 Бк/кг. Таким образом, данные аномалии не связаны с повышенными концентрациями радия в грунтах. Источники повышенного выделения радона и механизмы формирования выявленных аномалий ППР до конца пока не ясны. Аномалии

регистрируются в отдельных точках измерения ППР, причем в соседних точках, отстоящих от аномальных на 5–10 м, она, как правило, соответствует фоновым значениям и не превышает 20–200 мБк/м<sup>2</sup>с, что можно назвать “парадоксом факельных выбросов радона”.

Ранее авторами был проведен анализ пространственного распределения ППР на территории Москвы, было показано, что аномалии распределены в пространстве не случайным образом, а располагаются “кучно”, формируя хорошо выраженные зоны сгущения, пространственно тяготеющие к геодинамически активным зонам, выделяемым на территории города по комплексу структурно-геоморфологических и геолого-геофизических признаков [6]. Пространственная связь аномалий радона с такими зонами, обладающими повышенной проницаемостью, сама по себе не является удивительной, однако механизмы формирования газовых потоков в этих зонах остаются предметом дискуссии. Ряд авторов склонны связывать радоновые аномалии на платформенных территориях, в частности на территории Москвы, с дегазацией недр в узких линейных “флюидодинамических” зонах, формирующихся в фундаменте и пронизывающих осадочный чехол. Эти зоны ассоциируются с активизированными в новейшее время древними разломами в кристаллическом фундаменте. В пределах “флюидодинамических” зон предполагается существование интенсивных глубинных газовых потоков, выражающихся на поверхности в повышенных концентрациях радона в подпочвенном воздухе [8]. Однако такие взгляды слабо подтверждены экспериментальными данными. В залегающих субгоризонтально породах чехла, обводненных практически на всю мощность, даже в пределах проницаемых зон предпосылки для существования мощных пространственно локализованных глубинных вертикальных газовых потоков отсутствуют.

По мнению авторов, радоновые аномалии на платформах могут быть результатом дегазации приповерхностного массива пород в тектонически ослабленных, проницаемых геодинамически активных зонах. Причем формирование геодинамически активных зон происходит в современном поле напряжений, часто не связанном с разломной структурой древнего докембрийского фундамента. Повышенная проницаемость геодинамически активных зон обусловлена современными деформационными процессами, интенсивно протекающими в этих зонах, в том

числе непосредственно в приповерхностном слое земной коры, в рыхлых покровных четвертичных отложениях [15]. Массив горных пород, непосредственно граничащий с атмосферой, является открытой системой, в которой происходит активный обмен веществом и энергией между геосферами. Нагрузки, возникающие в нем, не могут быть в полной мере скомпенсированы, что делает его деформационно-неустойчивым и, соответственно, более проницаемым и открытым для переноса вещества. Следует отметить, что в условиях фоновых концентраций радия в породах, аномалии ППР с поверхности грунта могут формироваться только в случае аномально высокой скорости переноса радона в геологической среде [5]. Как упоминалось выше, концентрации радия на исследуемых аномальных площадках на порядки ниже необходимых для формирования столь сильных аномалий. То есть зарегистрированные аномалии ППР свидетельствуют о существовании на площадках аномальных интенсивных конвективных газовых потоков в геологической среде. Причем эти потоки распределены не равномерно по всей площади участка, а пространственно узко локализованы в отдельных точках, т.е. приурочены к узким каналам преимущественного переноса вещества. По грубым оценкам зарегистрированные аномалии могут формироваться при наличии конвективного потока газа, перемещающегося в толще пород со скоростью 5–10 м/сут с глубины 30–50 м, что на порядок выше значений, характерных для ненарушенного массива (глубина выноса радона 0.5–3.0 м при скорости переноса около 0.2–0.5 м/сут) [5]. Это означает, что выявленные аномалии ППР связаны с ослабленными сильно трещиноватыми зонами, обладающими резко повышенной газопроницаемостью геологической среды. Вместе с тем полученные фактические данные, строго говоря, не дают основания для предположений о существовании глубинных газовых потоков из кристаллического фундамента, как это делается в [8]. Однако на данном этапе для однозначных выводов о природе выявленных аномалий информации явно недостаточно. Выявленные геогенные радоновые аномалии представляют значительный интерес для решения геоэкологических задач, связанных с оценкой радоноопасности территорий. В целях уточнения наших знаний о радоновых аномалиях был проведен анализ временного распределения аномалий ППР на территории Москвы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

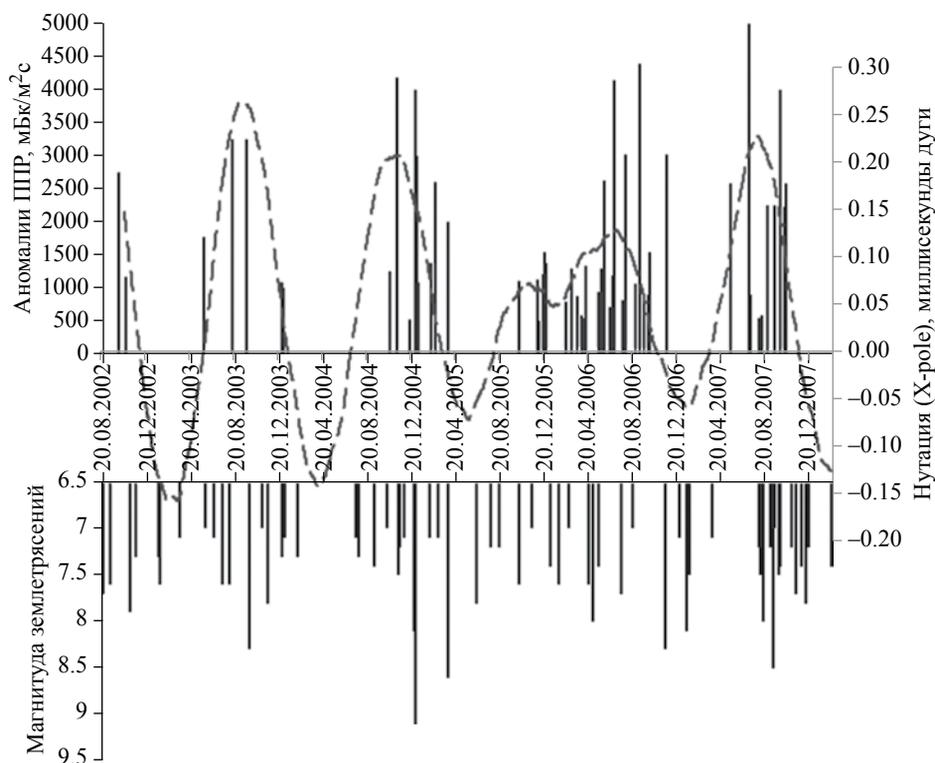
В данной работе используются результаты массовых измерений плотности потока радона на территории Москвы, полученные в рамках инженерно-экологических изысканий для строительства. Основной массив данных был предоставлен ГК «ЗАО РЭИ» и ООО «Геокон». Измерения ППР проводились по методу открытой камеры с активированным углем [18]. Камера с помещенным в нее активированным углем свободно общается с окружающей средой. Газовая смесь, выделяющаяся с поверхности грунта, проходит через слой активированного угля, где происходит сорбция радона, а затем свободно выходит в окружающую среду через верхнюю горловину накопительной камеры. Специальными исследованиями установлено, что практически весь радон, содержащийся в грунтовой газе, сорбируется на активированном угле (при концентрациях радона, характерных для подпочвенного воздуха, и времени экспонирования не более 10 час) [18]. Метод открытой камеры с активированным углем практически не нарушает естественные условия экспозиции радона, что является его неоспоримым преимуществом.

Проанализированы результаты приблизительно 20 000 измерений ППР, выполненных более чем на 900 участках строительства в течение 6 лет с 2002 по 2007 год включительно. В данный период, в отличие от предыдущих и последующих лет, инженерно-экологические изыскания на территории Москвы проводились наиболее массово, практически каждый день обследовалась одна или несколько строительных площадок, что позволяет говорить о представительности данных и наличии непрерывного ряда наблюдений. Учитывая, что территория города в целом охвачена достаточно густой сетью измерений, проводившихся каждый день по совершенно случайной схеме, можно сказать, что вся территория города была некоторым аналогом режимного полигона. В последующие годы в связи с экономическим кризисом, весьма существенно задевшем строительную отрасль столицы, количество обследуемых участков строительства резко сократилось, вплоть до 2–4 участков в месяц, и распределение обследованных участков во времени стало крайне неравномерным. Это не позволяет использовать данные, полученные после 2007 г., для анализа временного распределения аномалий радона. На каждом исследуемом участке строительства определялись также мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения и удельная активность естественных радионуклидов (в том числе радия-226) в грунтах до глубины проектируемого заложения

подошвы фундамента. Таким образом, на каждом из обследованных участков была получена исчерпывающая информация, характеризующая радоновое поле геологической среды, необходимая для анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ показывает, что аномалии ППР встречаются в любое время года и при самых разнообразных погодных условиях, в том числе весной и осенью в периоды сезонных минимумов ППР, обусловленных повышенным увлажнением и ротационным сжатием грунтов приповерхностного массива [5]. Зависимость частоты проявления радоновых аномалий от времени года не выявлена. Вместе с тем достаточно четко выделяются периоды учащенного проявления аномалий, сменяющиеся промежутками времени, в которых они встречаются значительно реже или не фиксируются вовсе. Причем максимумы частоты проявления аномалий ППР повторяются каждые 14–16 месяцев. Анализ литературы, посвященной периодичности различных процессов на Земле, показал, что среди всего многообразия природных процессов четко выраженный ритм с периодом около 14–16 мес характерен только для нутации оси вращения Земли. Нутация – передвижение оси вращения в теле Земли, приводящее к периодическим изменениям координат географического полюса и, соответственно, изменениям географических широт. По мнению ряда авторов, ось вращения Земли может изменять свое положение, кроме прочего, вследствие перераспределения масс в теле планеты за счет вынужденных движений внутреннего ядра планеты. Известно наличие определенной связи между периодами нутации земной оси и сейсмической активностью на планете [1]. Наличие связи с сейсмической активностью известно и для радонового поля. Из литературных данных известны факты, свидетельствующие об аномальной реакции радонового поля в пределах геодинамически активных зон и зон активных разломов на подготовку и реализацию сейсмических событий, в том числе крайне удаленных от пункта наблюдения. Так, в пределах геодинамически активных зон Москвы и Московской области была зафиксирована реакция радонового поля на подготовку и реализацию сильных землетрясений в Италии (Аквила, апрель 2009 г.) [2], на Алтае (сентябрь 2003 г.), в Индийском океане (декабрь 2004 г.) [8] и даже в Мексике (сентябрь 1985 г.) [3]. По нашим данным, было зафиксировано совпадение во времени аномалий ППР в Москве с серией мощных сейсмических толчков в Индийском океане (Суматра), произошедших в конце декабря 2004 г. В период с 24 по



Сопоставление временного распределения аномалий ППР на территории Москвы (верхний график), землетрясений с магнитудой  $M > 7$  в целом по земному шару (нижний график) и нутации земной оси – изменения координаты полюса  $x$  (пунктирная линия) в период с 2002 по 2007 год (включительно).

31 декабря 2004 г. аномальные значения ППР были зарегистрированы сразу на 4 участках, что сложно считать простым совпадением.

В этой связи было проведено сопоставление временного распределения аномалий ППР, зафиксированных в Москве, с периодами нутации оси вращения Земли (изменением координаты полюса  $x$ ), а также с датами сильных землетрясений с магнитудой 7 и более, произошедших на Земном шаре в период 2002–2007 гг. Данные по нутации земной оси находятся в открытом доступе на официальном сайте Международной службы земного вращения и эталонных мер (International Earth Rotation and Reference Systems Service, <http://www.iers.org>). Сведения о землетрясениях взяты из поискового каталога Расширенной национальной сейсмической системы США (ANSS Catalog Search, <http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html>), также использовались данные Геофизической службы РАН (<http://www.cemc.gsras.ru>). Результаты приведены на рисунке.

Как видно из рисунка, временные периоды проявления аномалий ППР нельзя считать случайными. Периоды частого проявления аномалий ППР совпадают с максимумами нутации оси вращения Земли, а также с моментами реализации наиболее сильных землетрясений на планете (с  $M > 7$ ).

Причем, эпицентры этих землетрясений расположены на расстоянии многих тысяч километров от исследуемой территории. Точное совпадение во времени проявления аномалий ППР с удаленными сейсмическими событиями (до дней, как в случае с землетрясением в Индийском океане в декабре 2004 г.) регистрируется далеко не всегда, однако эти события можно считать совпадающими в пределах месяца. С некоторой осторожностью можно говорить даже о существовании связи между амплитудой аномалий ППР и магнитудой наиболее сильных землетрясений. Так, время регистрации потоков радона более 3000 мБк/м<sup>3</sup> в пределах месяца совпадает по времени с реализацией землетрясений с  $M > 8$ .

Полученные данные позволяют предположить существование глобальных периодов “возмущенного” напряженно-деформируемого состояния планеты, связанных с режимом ее вращения (возможно, обусловленных перемещениями твердого ядра Земли). В эти периоды, совпадающие с периодами нутации земной оси, в зонах повышенных концентраций тектонических напряжений происходит их разрядка. В сейсмически активных областях эти процессы могут проявляться в виде землетрясений, в том числе сильных. В пределах же платформенных территорий, где тектонические напряжения

Сопоставление периодов регистрации гравитационных аномалий на станции “Binagadi” (Азербайджан), предшествующих сильным удаленным землетрясениям [9], с датами регистрации аномальных значений ППР в Москве

Дата, положение эпицентра и магнитуда землетрясения	Период регистрации гравитационной аномалии на станции “Binagadi”	Дата регистрации аномальной ППР в Москве (в скобках значение ППР, мБк/м <sup>2</sup> с)
15.10.2004, Тайвань, М 7	09.10.2004–24.10.2004	15.10.2004 (1240)
26.12.2004, Индонезия, М 9	03.12.2004–01.01.2005	08.12.2004 (1513) 25.12.2004 (2500) 26.12.2004 (4300) 31.12.2004 (1090)
13.03.2005, Южный Иран, М 6	01.03.2005–15.03.2005	18.02.2005 (2610)
26.03.2005, Индонезия, М 8.7	23.03.2005–31.03.2005	25.03.2005 (1990)
08.10.2005, Пакистан, М 7.7	02.10.2005–14.10.2005	9.10.2005 (1110)
27.05.2006, Индонезия, М 6.3	16.05.2006–28.05.2006	16.05.2006 (1002) 24.05.2006 (1288) 27.05.2006 (1040) 31.05.2006 (2630)
17.06.2006, Индонезия, М 7.7	09.06.2006–23.06.2006	15.06.2006 (989) 23.06.2006 (1180) 28.06.2006 (4150)
10.10.2006, Япония, М 6	02.10.2006–15.10.2006	02.10.2006 (1550)
15.11.2006, Курилы, М 8.3	14.11.2006–20.11.2006	21.11.2006 (3030)
26.12.2006, Тайвань, М 7.4	19.12.2006–27.12.2006	01.12.2006 (1030)

существенно слабее, их разрядка реализуется в геодинамически активных зонах в виде интенсивных деформаций, способных быть причиной формирования зон повышенной проницаемости и аномалий ППР.

В этой связи следует еще раз отметить возможную связь между выявленными аномалиями ППР и явлением “суперинтенсивных” деформаций (просадок) земной поверхности. Последние регистрируются высокоточным повторным нивелированием в геодинамически активных зонах платформ, причем скорость деформаций земной поверхности в этих аномальных зонах (до 70 мм в год) на порядок превышает фоновые значения, характерные для платформенных регионов [15]. Важно, что указанные суперинтенсивные деформации и выявленные аномалии ППР обладают общими характерными особенностями, например, и те, и другие:

- приурочены к геодинамически активным зонам,
- характеризуются дискретным распределением в пространстве,
- импульсно проявляются во времени (повторяются в одном и том же месте в разные интервалы времени);

– обладают резко нелинейным откликом на весьма слабые воздействия, в том числе на весьма отдаленные сильные землетрясения.

Перечисленные факты позволяют предполагать наличие связи между аномалиями ППР и суперинтенсивными деформациями земной поверхности. При формировании суперинтенсивных просадок, как указано в [15], реализуется механизм параметрического возбуждения (индуцирования) аномальных деформаций в геодинамически активной зоне, когда в качестве их источников выступает не внешнее поле напряжений (региональное, локальное), а автономные процессы, протекающие в самой зоне под влиянием крайне малых внешних воздействий. Точнее, побудительной причиной является изменение параметров среды (модуль жесткости, коэффициент трения и т.п.). Иными словами, слабое внешнее воздействие, достигшее геодинамически активной зоны, запускает в ней цепочку некоторых внутренних процессов, вызывающих суперинтенсивные деформации земной поверхности в форме просадок (опусканий), и, возможно, связанные с ними аномалии ППР из грунта.

Аномальный отклик на отдаленные сейсмические события известен не только для ППР и деформаций земной поверхности, но и для некоторых других параметров геосреды. Так в работе В.Е. Хаина и Э.Н. Халилова [9] описаны аномальные

изменения силы тяжести (гравитационной постоянной), периоды регистрации которых совпадают с сильными землетрясениями, удаленными на 4–7 тыс. км от регистрирующей станции. В указанной работе описано 10 крупных землетрясений, вызвавших аномальные вариации гравитационной постоянной на прогнозной станции “Binagadi” НИИ прогнозирования и изучения землетрясений (г. Баку) за период 2004–2006 гг. Авторы [9] объясняют реакцию вариаций силы тяжести на удаленные землетрясения квазипериодическими энергетическими выплесками в глубинных слоях Земли (предположительно на границе ядра и мантии). Эти выплески могут вызывать распространение сверхдлинных тектонических волн, попеременно изменяющих плотность пород по мере своего движения, что регистрируется гравиметрами в виде вариаций силы тяжести. Эти же тектонические волны, выраженные лавинной трещиноватостью, могут выступать в качестве триггера, т.е. инициировать резкое повышение напряжений в потенциально активных очаговых зонах, где напряжения достигли критических величин, что и вызывает землетрясения.

Интересно, что периоды аномальных изменений силы тяжести, совпадающие по времени с реализацией крупных землетрясений, зарегистрированные в работе [9], в целом совпадают с периодами проявления аномалий ППР, зафиксированных в Москве (таблица).

Из таблицы видно, что моменты реализации сильных землетрясений соответствуют периодам возмущения гравитационных полей на прогнозной станции в Баку и времени проявления аномальных значений ППР в геодинамически активных зонах на территории Москвы. Это может служить аргументом в пользу высказанной выше гипотезы о влиянии на ППР с поверхности грунта периодов повышенной сейсмотектонической активности планеты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что аномальные значения плотности потока радона, зафиксированные на территории Москвы, не случайны и, вероятно, связаны с глобальными геодинамическими процессами, протекающими в земной коре. Эти аномалии пространственно локализованы в геодинамически активных зонах, устанавливаемых по комплексу структурно-геоморфологических и неотектонических признаков, и проявляются в периоды повышенной геодинамической активности планеты. Анализ временного распределения аномалий ППР показывает, что выявленные аномалии — относительно редкое явление. На территории

Москвы за 10 лет проведения массовых, практически ежедневных измерений ППР (обследовано более 3000 участков измерений), было зарегистрировано всего 52 аномальных участка. Само обнаружение аномалий стало возможным в пределах Москвы только благодаря массовым измерениям ППР, проводимым на территории города в течение многих лет в ходе инженерно-экологических изысканий. Однако, несмотря на редкость проявления аномалий, крайне высокие значения ППР заставляют считать их одним из важнейших факторов, обуславливающих высокий геогенный радоновый потенциал территории и потенциальный радоновый риск. Столь высокие значения ППР до сих пор были зафиксированы только в районах добычи урановых руд. Кроме того, авторы статьи наблюдали подобные аномальные потоки радона из грунта на специально оборудованной экспериментальной площадке, расположенной в пределах активного тектонического сброса — интенсивной деформации растяжения, относящейся к Приморской разломной зоне Байкальской рифтовой системы. Сведения о регистрации подобных аномалий в пределах платформенных областей, в том числе в пределах Восточно-Европейской платформы, в литературе отсутствуют. Вместе с тем изучение геодинамических условий формирования аномалий позволяет утверждать, что это феномен не является специфической чертой именно Москвы, и должно быть характерен вообще для геодинамических зон платформ. В этой связи выявление и картирование подобных аномальных потоков радона, изучение закономерностей и условий их формирования — важнейшая и актуальнейшая задача геологических исследований, связанных с оценкой потенциальной радоноопасности.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 13-05-00975-а, № 13-05-01112-а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсюк Ю.Н., Суворова И.И. Процесс изменения широт и его связь с вынужденными перемещениями внутреннего твердого ядра // Физика Земли. 2006. № 7. С. 66–75.
2. Белецкая Ю.В., Крупный Г.И., Мамаев А.М., Расцветлов Я.Н. Вариации плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона // АНРИ. 2010. № 1. С. 34–36.
3. Бондаренко В.М., Сабо Я., Христич В. Закономерное отклонение геодинамических процессов в долговременных вариациях поля радона // Тр. 34-го Междунар. геофиз. симп. Будапешт. 1989. С. 287–289.

4. Макаров В.И., Бабак В.И., Дорожко А.Л., Бондаренко В.М., Демин Н.В. Влияние структурно-геологических особенностей на распределение концентраций подпочвенного радона и радона в подвалах жилых зданий (на примере района Чертаново г. Москвы) // Геоэкология. 2003. № 2. С. 139–152.
5. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: “Перо”, 2016. 394 с.
6. Микляев П.С., Макаров В.И., Дорожко А.Л., Петрова Т.Б., Маренный М.А., Маренный А.М., Макеев В.М. Радоновое поле Москвы // Геоэкология. 2013. № 2. С. 172–187.
7. Микляев П.С., Цапалов А.А., Маренный А.М., Лопатин М.Н., Мясников А.А., Фарафутдинов В.Т., Петрова Т.Б. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Ч. 7 – Результаты мониторинга радонового поля в зоне активного тектонического разлома в Байкальской рифтовой зоне // АНРИ. 2016. № 3. С. 19–34.
8. Рудаков В.П. Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир, 2009. 176 с.
9. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Гравитационные эффекты перед сильными удаленными землетрясениями // Вестник Международной академии наук (Русская секция). 2007. № 2. С. 45–52.
10. Abadi Ahmad Asadi Mohammad, Rahimi Mojtaba, Koopaei Leila Jabbari. The effect of geological structure on radon concentration dissolved in groundwater in nearby Anar fault based on a statistical analysis // J. Radioanal Nucl. Chem. 2016. V. 308. P. 801–807.
11. Ajrouche, R., Ielsch, G., Cléro, E., Roudier, C., Gay, D., Guillevic, J., Laurier, D., Le Tertre, A. Quantitative health risk assessment of indoor radon: a systematic review // 8<sup>th</sup> RADON conference + 13 GARMM International Workshop. Book of abstracts. Praha, August 2016. P. 48.
12. Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Baysson H., Bochicchio F. et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies // British Medical J. 2005. V. 330 (7485). P. 223–227.
13. Drolet J.-P., Martel R. Distance to faults as a proxy for radon gas concentration in dwellings // J. of Environmental Radioactivity. 2016. V. 152. P. 8–15.
14. Gruber V., Bossew P., De Cort M. and Tollefsen T. The European map of the geogenic radon potential // J. Radiol. Prot. 2013. V. 33. P. 51–60.
15. Kuzmin Yu.O. Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale // Geodynamics & Tectonophysics 2014. V.5 (2). P. 401–443.
16. Li Chenhua, Su Hejun, Zhang Hui, Zhou Huiling. Correlation between the spatial distribution of radon anomalies and fault activity in the northern margin of West Qinling Fault Zone, Central China // J. Radioanal Nucl. Chem. 2016. V. 308. P. 679–686.
17. Schläger M., Murtazaev Kh., Rakhmatuloev B., Zoriy P., Heuel-Fabianek B. Radon exhalation of the uranium tailings dump Digmai, Tajikistan // Fourth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD4, May 23–27, 2016, Niš, Serbia / Book of Abstracts. 2016. P. 487.
18. Tsapalov A., Kovler K., Miklyayev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface // J. of Environmental Radioactivity. 2016. V. 160. P. 28–35.
19. UNCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000. United Nations: New York. Annex B. 156 p.
20. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Hajo Zeeb, and Ferid Shannoun (ed.). World Health Organization. 2009. 94 p.

## REFERENCES

1. Avsyuk, Yu. N., Suvorova, I.I. *Protsess izmeneniya shirot i ego svyaz' s vynuuzhdennymi peremeshcheniyami vnutrennego tverdogo yadra* [The process of changing latitudes and its relation to forced movements of the Earth's inner solid core]. *Fizika Zemli*, 2006, no 7, pp. 66–75. (in Russian).
2. Beletskaya, Yu.V., Krupnyi, G.I., Mamaev, A.M., Rastsvetalov, Ya.N. *Variatsii plotnosti potoka radona s poverkhnosti pochvy eksperimental'nogo poligona* [Variations of radon flux density from the surface soil of the experimental area] *ANRI*, 2010, no 1, pp. 34–36. (in Russian).
3. Bondarenko, V.M., Sabo Ya., Hristich V. [The reflection of geodynamic processes in the long-term variations of radon]. *Abstrakty i doklady 34-ogo Mezhdunar. geofiz. simp. Budapesht* [Proc. 34<sup>th</sup> International Geophysical Symposium, Budapest]. 1989, pp. 287–289. (in Russian).
4. Makarov, V.I., Babak, V.I., Dorozhko, A.L., Bondarenko, V.M., Demin, N.V. *Vliyanie strukturno-geologicheskikh osobennostei na raspredelenie kontsentratsii podpochvennogo radona i radona v podvalakh zhilykh zdaniy (na primere raiona Chertanovo g. Moskvy)* [The influence of the structural-geological characteristics on the distribution of radon activity concentrations in soil gas and radon concentrations in basements of residential buildings (by the example of Chertanovo district, Moscow)]. *Geoekologiya*, 2003, no 2, pp. 139–152. (in Russian).
5. Marennyi, A.M., Tsapalov, A.A., Miklyayev, P.S., Petrova, T.B. *Zakonomernosti formirovaniya radonovogo polya v geologicheskoi srede* [Regularities of radon field formation in the geological environment], Moscow, Pero Publ., 2016, 394 p. (in Russian).
6. Miklyayev, P.S., Makarov, V.I., Dorozhko, A.L., Petrova, T.B., Marennyi, M.A., Marennyi, A.M., Makeev, V.M. *Radonovoe pole Moskvy* [Radon field in Moscow] *Geoekologiya*, 2013, no 2, pp. 172–187. (in Russian).
7. Miklyayev, P.S., Tsapalov, A.A., Marennyi, A.M., Lopatin, M.N., Mясников, A.A., Farafutdinov, V.T., Petrova, T.B. *Kompleksnye monitoringovye issledovaniya formirovaniya radonovykh polei gruntovykh massivov. Chast' 7 – Rezul'taty monitoringa radonovogo polya v zone aktivnogo tektonicheskogo razloma v Baikal'skoi riftovoi zone* [A comprehensive monitoring study of the radon in soil. Part 7 – the Results

- of monitoring of radon in the zone of active tectonic fault in the Baikal rift zone] *ANRI*. 2016, no 3, pp.19–34. (in Russian).
8. Rudakov, V.P. *Emanatsionnyi monitoring geosred i protsessov* [Emanation monitoring of geomeidia and processes] Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2009, 176 p. (in Russian).
  9. Khain, V.E., Khalilov, Ye.N. Gravitatsionnye efekty pered sil'nymi udalennymi zemletryasenyami [Effects of gravity before the strong distant earthquakes] *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii nauk (Russkaya sektsiya)*. 2007, no 2, pp. 45–52. (in Russian).
  10. Abadi Ahmad Asadi Mohammad, Rahimi Mojtaba, Koo-paei Leila Jabbari. The effect of geological structure on radon concentration dissolved in groundwater in nearby Anar fault based on a statistical analysis. *J. Radioanal Nucl Chem*. 2016, vol. 308, pp. 801–807.
  11. Ajrouche, R., Ielsch, G., Cléro, E., Roudier, C., Gay, D., Guillevic, J., Laurier, D., Le Tertre, A. Quantitative health risk assessment of indoor radon: a systematic review. 8<sup>th</sup> RADON conference + 13 GARMM International Workshop. Book of abstracts. Praha, August 2016, p. 48.
  12. Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Baysson H., Bochicchio F., Deo H., Falk R., Forastiere F., Hakama M., Heid I., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruano-Ravina A., Ruostenoja E., Schaffrath Rosario A., Tirmarche M., Tomáček L., Whitley E., Wichmann H.E., Dol R. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical J.*, 2005, vol. 330 (7485), pp. 223–227.
  13. Drolet, J.-P., Martel, R. Distance to faults as a proxy for radon gas concentration in dwellings. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 152, pp. 8–15.
  14. Gruber V., Bossew P., De Cort M. and Tollefsen T. The European map of the geogenic radon potential. *J. Radiol. Prot.*, 2013, vol. 33, pp. 51–60.
  15. Kuzmin, Yu.O. Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, vol. 5 (2), pp. 401–443.
  16. Li Chenhua, Su Hejun, Zhang Hui, Zhou Huiling. Correlation between the spatial distribution of radon anomalies and fault activity in the northern margin of West Qinling Fault Zone, Central China. *J. Radioanal Nucl Chem.*, 2016, vol. 308, pp. 679–686.
  17. Schläger, M., Murtazaev, Kh., Rakhmatuloev, B., Zoriy, P., Heuel-Fabianek, B. Radon exhalation of the uranium tailings dump Digmai, Tajikistan. Fourth International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD4, May 23–27, 2016, Niš, Serbia. Book of Abstracts. 2016, pp. 487.
  18. Tsapalov, A., Kovler, K., Miklyaev, P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 160, pp. 28–35.
  19. UNCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000. United Nations: New York. Annex B. 156 p.
  20. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Hajo Zeeb and Ferid Shannoun, Eds. World Health Organization. 2009. 94 p.

## ABNORMAL RADON EXHALATION RATE IN MOSCOW

P. S. Miklyaev\*, T. B. Petrova\*\*, V. M. Makeev \*, A.V. Klimshin\*\*\*

\*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences (IEG RAS), Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: peterm7@inbox.ru, vmakeev@mail.ru

\*\*Lomonosov Moscow State University, Radiochemical Department (MSU), Leninskie Gory, 1, bld. 10, Moscow, 119991 Russia. E-mail: alpinzayac@mail.ru

\*\*\*Institute of Geophysics, Ural branch of Russian Academy of Sciences, ul. Amundsena 100, Yekaterinburg, 620016 Russia. E-mail: aklimshin@yandex.ru

The temporal distribution of the abnormal radon exhalation rate on the territory of Moscow was analyzed. The radon exhalation rate was measured on the construction sites during the engineering geological surveys. The data obtained from 900 construction sites (about 20000 measurements of radon exhalation rate) in the period since 2002 till 2007 were analyzed. During this period 52 sites with abnormal values of radon exhalation rate (more than 1000 mBq/m<sup>2</sup>sec) were identified. The analysis allows us to allocate periods of frequent anomalies of radon exhalation rate, which are followed by the intervals showing almost no anomalies. Periods of frequent anomalies repeat every 14–16 months. We have drawn a correlation between the periods of abnormal radon exhalation and the nutation of the earth's axis. We also have revealed a relationship between the radon anomalies and the seismic activity of the Earth, namely, the number of earthquakes with a magnitude of more than 7. This suggests that the observed radon anomalies are not random events, but they are related to the geodynamic regime of the Earth. The established anomalies of radon exhalation rate should be taken into account in the assessment and mapping of potential radon hazard.

**Key words:** radon, radon exhalation rate, abnormal radon flux density, geodynamyc zones, active tectonic fault.