

Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 6 – анализ закономерностей временных вариаций радонового поля

В статье приводятся результаты анализа данных долгосрочного мониторинга плотности потока радона с поверхности грунта и объемной активности радона в грунтовом воздухе на экспериментальных площадках, расположенных на открытой местности и в подвалах зданий в Москве, Рязанской области, Екатеринбурге, Пятигорске и Иркутске. По результатам анализа установлены факторы, определяющие формирование радоновых полей грунтовых массивов, а также выявлены основные закономерности временных колебаний параметров радонового поля.

Ключевые слова: радон, мониторинг радона, плотность потока радона, объемная активность радона в грунте, экспериментальная площадка.

А.М.Маренный¹, П.С.Микляев^{1,2}, А.А.Цапалов¹, А.В.Климшин³, Т.Б.Петрова⁴, А.В.Пенезев¹

¹ФГУП НТЦ радиационной и химической безопасности ФМБА России, г.Москва; ²Институт геоэкологии им.Е.М.Сергеева РАН, г.Москва; ³ФГБУН Институт геофизики им.Ю.П.Булашевича УрО РАН, г.Екатеринбург; ⁴ФБГОУ ВО МГУ им.М.В.Ломоносова, г.Москва.

Введение. В результате проведенных мониторинговых исследований были получены длительные непрерывные ряды данных наблюдений, характеризующих динамику изменения ППР и ОА радона на различных глубинах в объеме грунтовых массивов в различных геолого-тектонических и климатических условиях [1-5]. Полученный материал позволяет провести комплексный анализ закономерностей временных вариаций радонового поля, прежде всего, с целью развития методологии оценки потенциальной радоноопасности участков строительства.

Вариации плотности потока радона с поверхности грунта.

Для оценки влияния различных природных факторов на плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта был проведен корреляционный анализ зависимости ППР от метеорологических факторов, таких как температура

воздуха на высоте 1 м от поверхности земли ($T_{\text{возд}}$), скорость воздушного потока на высоте 1 м от поверхности ($V_{\text{ветра}}$), атмосферное давление ($P_{\text{атм}}$), градиент атмосферного давления в период проведения измерений, представляющий собой разность атмосферного давления в начале и в конце измерений ($\Delta P_{\text{атм}}$). Кроме того, были проанализированы зависимости ППР от глубины залегания уровня грунтовых вод (УГВ), а также от влажности верхнего 5-сантиметрового слоя почвы в теплый период года ($W_{\text{почвы}}$). Все перечисленные показатели определялись в ходе мониторинга на экспериментальных площадках [1-3]. Результаты корреляционного анализа приведены в табл.1.

Как видно из таблицы, из всех перечисленных факторов наиболее тесно с ППР связана влажность почв в верхнем 5-сантиметровом слое. Следует отметить, что данная корреляция проявляется

только в теплый период года, когда почва не промерзла, т.е. обычно с апреля по декабрь (на Иркутской ЭП с мая по сентябрь). В зимний период определение влажности почвы затруднительно, т.к. влага находится в поровом пространстве почв, как в жидкой, так и в твердой фазе, в виде льда. Корреляция носит обратный характер, т.е. при увеличении влажности почвы ППР снижается, и наоборот. Связь ППР с влажностью почвы проявляется на всех открытых площадках, кроме площадки, характеризующейся аномальным радоновым полем, расположенной в зоне влияния тектонического разлома (аномальная Иркутская ЭП). В подвалах зданий корреляция между влажностью грунтов подвала и ППР отсутствует. Тесная связь между ППР и влажностью почв ранее была установлена на мониторинговой площадке в Москве Л.А.Гулабянцем и Б.Ю.Заболоцким [6]. По результатам, полученным в ходе данных исследований, мож-

Табл. 1. Значения коэффициентов корреляции (r) между ППР и поверхностными факторами на экспериментальных площадках (жирным выделены $r > 0,45$).

Экспериментальная площадка	Поверхностные факторы					
	$T_{\text{возд}}$	$V_{\text{ветра}}$	$P_{\text{атм}}$	$\Delta P_{\text{атм}}$	УГВ	$W_{\text{почвы}}$
Московская (открытый грунт)	0,28	-0,19	0,20	- 0,48	-	- 0,57
Рязанская (открытый грунт)	- 0,42	0,10	0,15	0,06	0,40	- 0,81
Рязанская (подвал здания)	0,33	-	- 0,30	- 0,05	- 0,22	- 0,07
Екатеринбургская-1 (гранит)	0,69	- 0,16	- 0,06	- 0,10	0,26	- 0,63
Екатеринбургская-2 (габбро-диабаз)	0,23	- 0,27	0,01	- 0,11	0,13	- 0,54
Екатеринбургская-3 (подвал здания)	0,31	-	0,08	- 0,19	0,42	- 0,22
Пятигорская (открытый грунт)	0,58	- 0,34	0,40	- 0,01	- 0,16	- 0,73
Иркутская (фоновая)	0,46	- 0,12	- 0,28	0,11	-	- 0,60
Иркутская (аномальная)	0,83	0,38	- 0,66	- 0,14	-	0,26

но заключить, что подобная закономерность носит универсальный характер и свойственна вообще открытым территориям, за исключением, возможно, некоторых участков с аномальным радоновым полем. Действие влажности почвы на ППР объясняется тем,

что при уменьшении влажности верхнего слоя почв степень заполнения пор водой уменьшается и, соответственно, увеличивается коэффициент диффузии радона в порах грунта, их газопроницаемость, что вызывает рост плотности потока радона с поверх-

ности грунта, и наоборот, увлажнение почв приводит к снижению ППР.

На рис.1 приведены графики в виде диаграмм рассеяния зависимости ППР от влажности почв на исследуемых площадках. Из этих графиков видно, что на разных

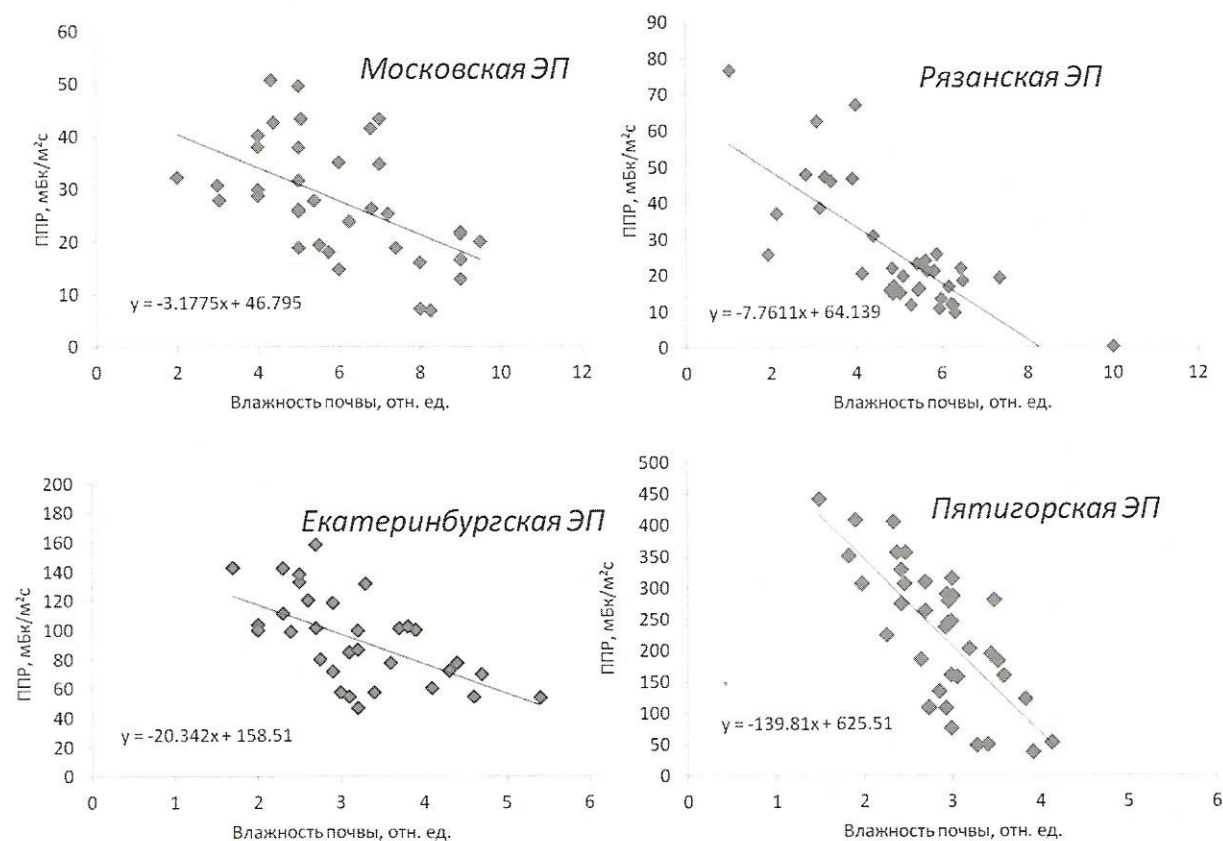


Рис. 1. Зависимость ППР от влажности (исключая зимний период).

площадках изменение влажности неодинаково влияет на плотность потока радона, что отображается в различии коэффициентов в уравнениях тренда. Так, на Московской ЭП (среднее значение ППР в теплый период года $40 \text{ мБк/м}^2\text{с}$) увеличение влажности почвы на 1 условную единицу вызывает изменение ППР примерно на $3 \text{ мБк/м}^2\text{с}$, а на Пятигорской площадке (среднее значение ППР в теплый период года $225 \text{ мБк/м}^2\text{с}$) такое же увеличение влажности приводит к падению ППР на $140 \text{ мБк/м}^2\text{с}$. Из приведенных данных можно сделать вывод, что степень влияния влажности почвы на ППР увеличивается с увеличением проницаемости почвы и среднегодовой величины плотности потока радона. Таким образом, полученная закономерность, хоть и является повсеместной, но не позволяет вывести универсальную формулу для введения поправки «на влажность» при оценке среднегодового ППР с поверхности грунта, т.к. на каждом участке степень влияния влажности на ППР различна, и заранее неизвестна.

На радоновое поле оказывает весьма существенное влияние не только влажность верхнего слоя почв, но и влагонасыщенность грунтов зоны аэрации в целом (массива грунтов от поверхности земли до уровня грунтовых вод). При сильном переувлажнении зоны аэрации в весенний период (в результате инфильтрации в массив талых вод) поток радона с поверхности грунта на всех площадках снижается до минимальных значений. Подобный эффект также проявляется в конце осени – начале зимы при обильных

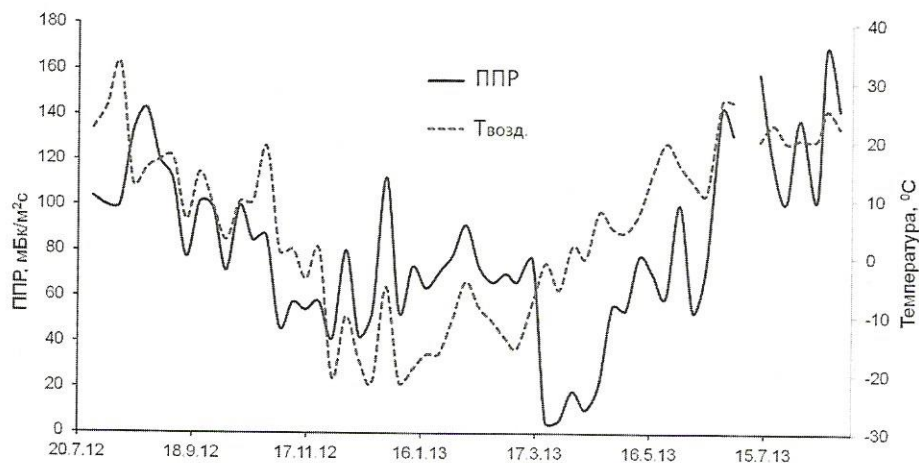


Рис.2. Колебания ППР и температуры воздуха на Екатеринбургской-1 экспериментальной площадке (открытая часть, сложенная гранитом).

осенних дождях и таянии первого снега, но в меньшей степени. Ярким примером влияния обводнения приповерхностной толщи грунтов на ППР являются результаты мониторинга на Рязанской ЭП [3]. На этой площадке в результате инфильтрации талых вод в толщу грунта и последующего подъема уровня грунтовых вод участок исследований был подтоплен и оставался в таком состоянии в течение всего лета и осени 2012 года (после нескольких предыдущих очень жарких и засушливых лет). Плотность потока радона на участке весной резко снизилась и оставалась низкой до конца периода наблюдений. В результате на Рязанской ЭП наблюдается своеобразный ход ППР: здесь отсутствуют периоды колебаний, характерные для остальных участков (максимумы летом и зимой; минимумы осенью и весной), а значения ППР в зимний период существенно превышают таковые летом. Из полученных данных следует, в том числе, что периоды сильного увлажнения приповерхностных грунтов и почв являются крайне неблагоприятным временем для проведения измерений плотности потока радона с целью оценки потенциальной радоноопасности терри-

торий, т.к. измеренные в эти периоды значения ППР не характеризуют радоновыделение из грунтов на обследуемой территории.

Очевидно, что влажность – не единственный фактор, определяющий временные колебания ППР. Как видно из табл.1, на некоторых площадках наблюдается значимая положительная корреляционная связь между плотностью потока радона и температурой воздуха. В наибольшей степени влияние температуры воздуха на ППР проявляется на площадках, сложенных хорошо проницаемыми продуктами разрушения скальных коренных пород, обладающих высокой теплопроводностью и низкой теплоемкостью (Екатеринбургская, Пятигорская, Иркутская). Ярким примером такой зависимости могут служить данные, полученные на открытой Екатеринбургской-1 площадке, приведенные на рис.2. Из рисунка видно, что совпадают не только общая направленность колебаний, но даже и локальные минимумы и максимумы. Влияние температуры воздуха на ППР очевидно связано с неравномерным прогревом (охлаждением) верхнего слоя грунтов и почв, вызывающим изменение геометрии порового пространства (за счет температурных де-

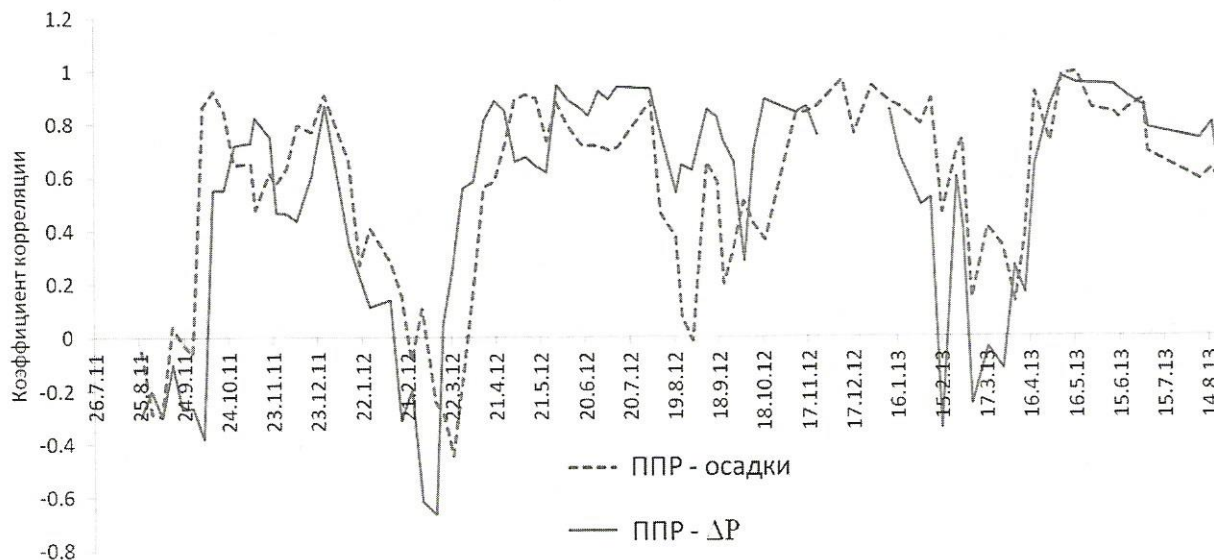


Рис.3. Функции скользящей корреляции между ППР и количеством осадков за неделю, предшествующую измерениям, а также ППР и перепадом атмосферного давления в момент измерений (ΔP) на Московской ЭП.

формаций грунта), степени заполнения пор водой (за счет конденсации и испарения влаги). Изменение температуры среды влияет также на растворимость радона в поровой влаге. Все это сказывается на скорости газообмена и конвективно-диффузионного переноса радона в приповерхностных грунтах.

В слабопроницаемых влажных грунтах, обладающих высокой теплоемкостью и низкой теплопроводностью, какими являются глины, суглинки и пески Московской и Рязанской ЭП, описанные выше эффекты выражены слабо. В связи с этим зависимость ППР от температуры на данных площадках не выражена. В подвалах зданий значимая корреляция между температурой воздуха и ППР также не зафиксирована. Следует отметить, что на Рязанской ЭП наблюдается не прямая, а обратная корреляция между температурой воздуха и ППР. Этот эффект ни в коем случае не характеризует влияние температуры воздуха на плотность потока радона, а связан исключительно с необычным сезонным ходом ППР на данной площадке. Как указывалось выше,

летом здесь наблюдались значения ППР, существенно меньшие, чем зимой – с этим и связана «кажущаяся» обратная корреляция между ППР и температурой воздуха. Детальный анализ данных показывает в целом отсутствие значимой корреляционной связи между температурой воздуха и ППР на Рязанской площадке.

На плотность потока радона с поверхности грунта также влияют перепады атмосферного давления в момент проведения измерений, что выражается в наличии значимой отрицательной корреляции между ППР и градиентом изменения давления за время измерения ($\Delta P_{\text{атм}}$). Подобная зависимость установлена только на Московской ЭП, сложенной с поверхности слабопроницаемыми суглинками и глинами. Влияние перепадов атмосферного давления на ППР с поверхности глинистых грунтов в целом для территории Москвы было установлено ранее в работе [7]. Резкие перепады атмосферного давления вызывают изменение направления переноса почвенного воздуха в системе «почва–атмосфера», что, скорее всего, сказывается на плотности потока

радона из грунтов. Вместе с тем, на экспериментальных площадках, сложенных хорошо проницаемыми отложениями (Екатеринбургская, Пятигорская, Иркутская ЭП), подобных корреляций не выявлено. Это может быть обусловлено тем, что при падении атмосферного давления «разгрузка» почвенного воздуха в слабопроницаемых грунтах происходит не равномерно по всему объему грунта, а приурочена к каналам преимущественного переноса – вторичным макропорам, образовавшимся при отмирании корней растений, в результате жизнедеятельности почвенных организмов и т.п. При падении атмосферного давления в таких каналах преимущественного переноса формируются локальные сосредоточенные токи почвенного воздуха, что, по-видимому, вызывает появление высоких значений ППР. В хорошо проницаемых отложениях вынос почвенного воздуха при падении атмосферного давления рассредоточен равномерно по объему массива грунта, и каких-либо существенных изменений плотности потока радона этот фактор не вызывает.

По результатам мониторинга на Московской ЭП установлено также, что степень влияния на ППР перепадов атмосферного давления не постоянна во времени, а характеризуется достаточно четкой периодичностью. Причем, такое же периодическое влияние на ППР характерно и для других метеофакторов, например, суммы осадков за неделю, предшествующую измерениям*. На рис.3 приведены функции скользящей корреляции (с окном осреднения 30 суток) между значениями ППР и количеством осадков за неделю, предшествующую измерениям (по данным метеостанции Домодедово), а также ППР и перепадом атмосферного давления в момент измерений на Московской ЭП. Как видно из рисунка, значимая отрицательная корреляция между ППР и этими параметрами наблюдается в одни и те же временные периоды: с конца октября по начало января, а также с конца апреля по начало августа. В периоды с января по апрель, а также, в меньшей степени, с августа по октябрь влияние указанных метеорологических факторов на плотность потока радона резко снижается. Слабое влияние метеофакторов на ППР в период с января по апрель вполне может быть объяснено наличием в этот период снежного покрова, промерзанием грунтов и избыточным увлажнением верхнего почвенного слоя при весеннем таянии снега. В таких условиях грунтовый массив, можно сказать, «экранируется» от воздействия внешних атмосферных факторов. Однако снижение корреляционной связи между ППР и метеофакторами в конце лета – осенью (с августа по октябрь) объяснить сложнее. Здесь, судя по всему, действуют причины, природу которых еще предстоит выяснить.

На плотность потока радона влияет также промерзание грунта. Однако влияние этого фактора носит неоднозначный характер, зависящий от состава грунта, его предзимней влажности, глубины промерзания и др. параметров. По результатам наблюдений на площадках, в зимнее время в целом плотность потока радона снижается, однако в отдельные периоды может наблюдаться рост ППР. Причем, как правило, снижение ППР связано с оттепелями, а в сильные морозы происходит повышение плотности потока радона. Увеличение ППР при промерзании грунта может быть связано с перераспределением и частичным вымерзанием влаги в поровом пространстве. В результате в тонкодисперсных отложениях происходят криогенные деформации – увеличение объема грунта за счет замерзания влаги и образования шпиров льда, в грунтах образуются трещины и пустоты, часто не заполненные льдом и влагой, что может способствовать росту плотности потока радона с поверхности земли. Вместе с тем, при промерзании грубодисперсных сильноувлажненных грунтов, возможно образование т.н. «льдогрунта», в котором практически все поры и пустоты заполнены льдом, что может вызывать резкое снижение ППР с поверхности такого грунта [8].

В определенных условиях на плотность потока радона может влиять изменение уровня грунтовых вод. Так, на ЭП Екатеринбург-

гская-1, характеризующейся высокой объемной активностью радона в грунтовом воздухе, хорошей проницаемостью грунта и неглубоким залеганием грунтовых вод, установлено увеличение плотности потока радона при повышении уровня грунтовых вод (глубина залегания УГВ изменялась от 3,5 до 0,7 м). В данном случае решающая роль может принадлежать механизму «поршневого выдавливания» грунтового воздуха при повышении УГВ. Однако данный механизм может работать только при следующих условиях: высокой проницаемости грунтов зоны аэрации, значительной объемной активности радона в поровом воздухе и неглубоком залегании грунтовых вод (когда амплитуда колебаний уровня грунтовых вод сопоставима с мощностью зоны аэрации). Такие условия наблюдались только на ЭП Екатеринбургская-1 [9].

Таким образом, можно заключить, что основным и универсальным фактором, влияющим на ППР, является влажность грунтов и почв, слагающих участок. Кроме того, на ППР влияют такие факторы, как колебания температуры воздуха (в хорошо проницаемых грунтах с высокой теплопроводностью), изменения атмосферного давления (в слабопроницаемых глинистых грунтах), а также промерзание грунтов и, в определенных условиях, изменения уровня грунтовых вод. Необходимо отметить, что влияние перечисленных факторов сложным

Табл.2. Коэффициенты корреляции между временными изменениями ППР на различных экспериментальных площадках.

	Екатеринбургская-2	Пятигорская	Московская
Екатеринбургская-1	0,68	0,52	0,56
Екатеринбургская-2	–	0,48	0,58
Пятигорская	–	–	0,64
Рязанская	–	–	0,32

* Связь между ППР и суммой осадков за неделю, предшествующую моменту измерений, по нашему мнению, обусловлена изменением влажности почв.

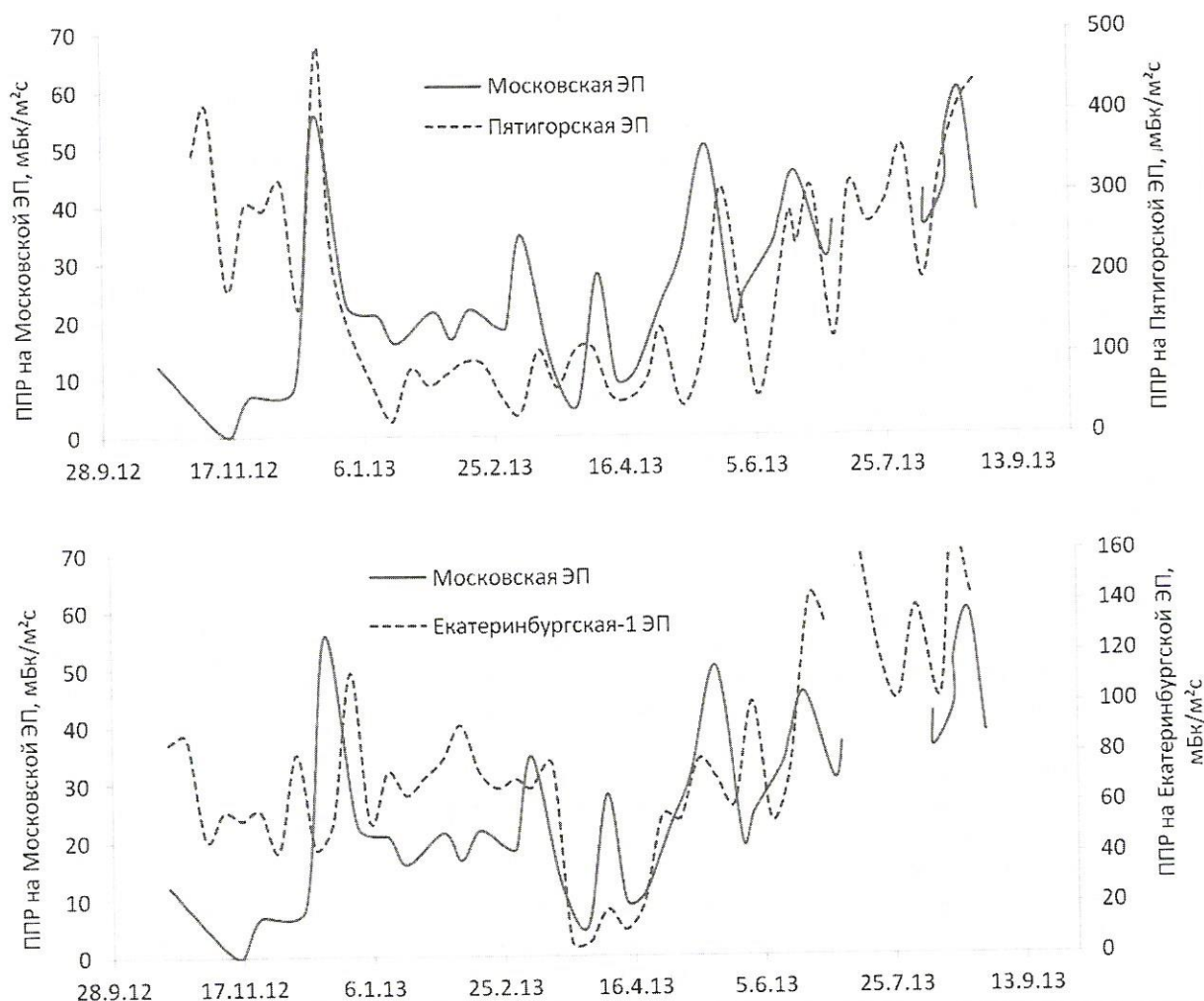


Рис.4. Сопоставление временных колебаний ППР на Московской и Пятигорской (верхний график), и на Московской и Екатеринбургской-1 (нижний график) экспериментальных площадках.

образом накладывается друг на друга, в результате чего общая картина колебаний ППР носит сложный характер, трудно поддающийся расшифровке.

Вместе с тем, сопоставление между собой данных, полученных на исследованных площадках, показывает хорошее совпадение временного хода ППР на всех ЭП, независимо от их геологического строения, радиационно-физических свойств грунтов и др. параметров. В некоторые моменты времени на площадках наблюдаются буквально синхронные колебания плотности потока радона, которые нельзя объяснить локальным действием перечисленных выше факторов. Высокую

корреляцию между плотностью потока радона на исследованных ЭП иллюстрируют табл.2 и рис.4. На рисунке в качестве примера показано сопоставление временных колебаний ППР на Пятигорской, Екатеринбургской-1 и Московской площадках. Выпадает из общей картины только Рязанская ЭП, что связано с особым времен-

ным ходом ППР на данной площадке, описанным выше.

Интересно, что значимая корреляция наблюдается между временным ходом ППР на территориях, удаленных друг от друга на тысячи километров, и характеризующихся совершенно разным геологическим строением и климатическими особенностями. Нап-

Табл.3. Корреляция между плотностью потока радона и величиной отклонения длительности суток от эталонных (δp).

Экспериментальная площадка	Коэффициент корреляции между ППР и δp
Московская	-0,71
Рязанская	-0,12
Екатеринбургская-1	-0,83
Екатеринбургская-2	-0,78
Пятигорская	-0,56

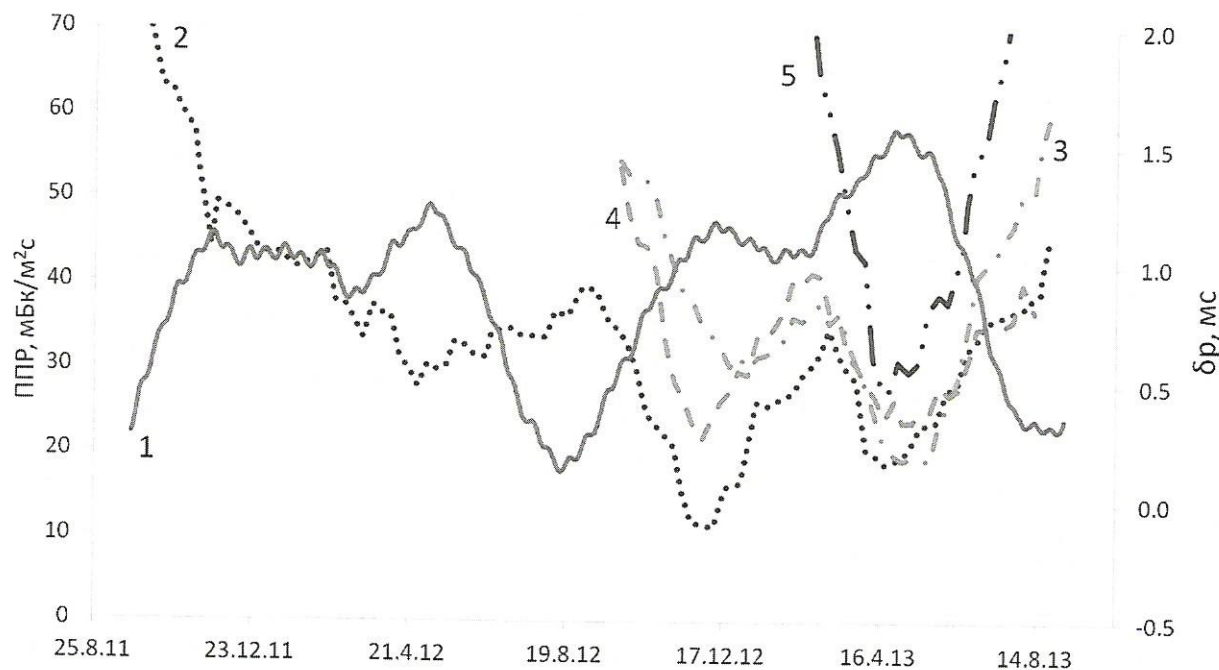


Рис.5. Сопоставление изменения отклонения длительности суток от эталонных δp (1) и колебаний плотности потока радона на ЭП: Московской (2), Екатеринбургской-1 (3), Екатеринбургской-2 (4), Пятигорской (5). Данные усреднены по 30 дням (фильтр по скользящему среднему). Для наглядности (возможности представить все данные на одном графике) результаты измерений ППР были умножены на постоянный множитель k : $k = 1$ для Московской ЭП; $k = 0,5$ для Екатеринбургской-1 ЭП; $k = 3,0$ для Екатеринбургской-2 ЭП; $k = 0,4$ для Пятигорской ЭП.

пример, коэффициент корреляции между значениями ППР на Московской и Пятигорской площадках, удаленных друг от друга более чем на 1300 км, составляет 0,64. Примерно такое же значение коэффициента корреляции (0,68) получено для площадок Екатеринбургской-1 и Екатеринбургской-2, расположенных в 10–30 м друг от друга.

Очевидно, что причины столь синхронного изменения ППР на столь удаленных территориях кроются в действии некоторых глобальных факторов, одинаково влияющих на поток радона из грунтов в атмосферу на всех исследованных ЭП. Этим фактором, проявляющим схожее влияние на радоновое поле и в центральной части Русской равнины, и на Среднем Урале, и на Северном Кавказе, независимо от геологического строения и географического положения территорий, может выступать изменение ротационного режима планеты (измене-

ния скорости вращения Земли). Связь сезонных колебаний объемной активности радона в грунтах с изменением скорости вращения Земли отмечалась на основе локальных наблюдений многими исследователями [10,11]. Известно, что в результате приспособления геоида к меняющемуся ротационному режиму планеты (изменению осевой скорости вращения земли), возникают периодические вертикальные деформации земной поверхности, обусловленные волнами сжатия-растяжения ротационной природы, и регистрирующиеся по вертикальным перемещениям грунтовых реперов [11].

В этой связи нами было проведено сопоставление данных мониторинга ППР на рассматриваемых экспериментальных площадках с изменением скорости вращения Земли. В качестве параметра, характеризующего скорость вращения Земли, была взята величина отклонения длительности суток от эталонных (δp). Данные

по колебаниям длительности суток были взяты на официальном сайте Международной службы земного вращения и эталонных мер (International Earth Rotation and Reference Systems Service) [12]. Результаты сопоставления приведены в табл.3 и на рис.5. Сопоставление показало, что на всех исследуемых площадках (кроме Рязанской ЭП) значения плотности потока радона, усредненные по 30 дням (фильтр по скользящему среднему), проявляют мощную обратную корреляцию с усредненными таким же образом значениями отклонения длительности суток от эталонных. Полученные корреляции свидетельствуют о том, что плотность потока радона с поверхности грунта растет при уменьшении длительности суток, то есть, при увеличении скорости вращения Земли, и наоборот, снижается при замедлении земного вращения.

По нашему мнению, наблюдаемая синхронность вариаций ППР

на исследованных экспериментальных площадках объясняется общей глобальной причиной – изменением проницаемости приповерхностных грунтов за счет периодического воздействия напряжений сжатия-растяжения, возникающих в массиве под воздействием сил ротационной природы. Как было показано в публикации [3], в годовом ходе ППР выделяются два максимума и два минимума – в конце лета и в начале зимы. Максимальные значения плотности потока радона совпадают с периодами максимумов скорости вращения Земли. В эти периоды в приповерхностном грунтовом массиве преобладают напряжения растяжения [11]. При этом зимний максимум ППР, как и зимний максимум скорости вращения земли, значительно меньше летнего. Минимумы в годовом ходе ППР проявляются в

периоды наибольших сжимающих напряжений в грунтах (конец октября – начало ноября и март – начало апреля). Поэтому можно предположить, что изменение скорости вращения Земли является глобальным постоянно и повсеместно действующим фактором, существенно влияющим на временные колебания плотности потока радона с поверхности грунта.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что плотность потока радона с поверхности грунта испытывает существенные временные колебания, вызванные сочетанием влияния большого количества факторов, как локального, местного, так и глобального, планетарного характера. Причем, колебания ППР обусловлены, прежде всего, изменением проницаемости почв и грунтов, связанны-

ми с локальными колебаниями влажности и температуры грунтов на площадке в момент измерений, а также с ротационными деформациями приповерхностного слоя грунтов. При определенных условиях на ППР также может влиять возникновение пневматических градиентов в поровом пространстве почв и приповерхностных грунтов при резких перепадах атмосферного давления, изменении уровня грунтовых вод и т.п.

В этой связи интерес представляет сопоставление временных колебаний ППР с поверхностью грунта на открытых участках (в полной мере подверженных влиянию перечисленных выше факторов) и с поверхности грунтового пола подвалов зданий, защищенных от атмосферного влияния, и характеризующихся стабильным температурным и влажностным режимом. Сопоставле-

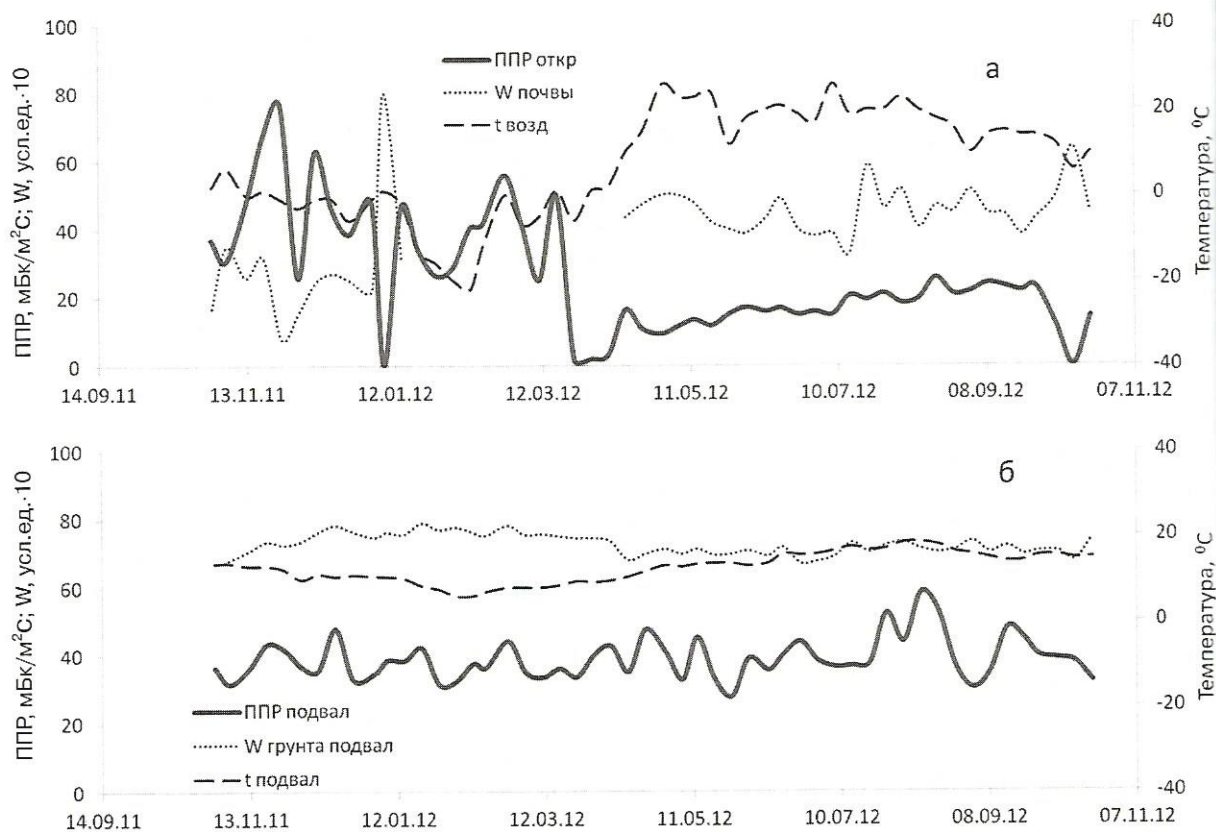


Рис.6. Результаты мониторинга ППР, температуры воздуха и влажности почвы (грунта) на открытом грунте (а) и в подвале здания (б) на Рязанской ЭП в период с октября 2011 по ноябрь 2012.

ние показывает, что временные колебания ППР в подвалах зданий незначительны по сравнению с колебаниями этой величины на открытых участках и не превышают 30 % от среднего, т.е., строго говоря, не выходят за пределы погрешности измерений. Сравнение результатов мониторинга ППР на Рязанской ЭП в подвале кирпичного отапливаемого одноэтажного здания (деревенский дом) и на открытом грунте в непосредственной близости от этого дома приведены на рис.6.

Как видно из рисунка, динамика ППР на открытом грунте и в подвале дома кардинально различается. Так, на открытом грунте Рязанской ЭП весной 2012 года произошло резкое снижение плотности потока радона с поверхности открытого грунта, что, как указано выше, связано с переувлажнением верхнего почвенного слоя. Как видно из рисунка, резкое снижение ППР совпадает по времени с переходом температуры воздуха через нулевую отметку и повышением влажности грунта. Однако в подвале небольшого деревенского дома, где температура и влажность грунта в течение всего периода наблюдений оставалась относительно постоянной, плотность потока радона с поверхности грунта в подвале изменялась слабо. Незначительные всплески ППР в подвале объясняются периодическим обильным увлажнением грунта снаружи зда-

ния после сильных дождей, в результате чего поток радона перенаправляется в область сухого грунта, т.е. в подвал здания с небольшой площадью основания. Кроме того, обработка данных показывает, что плотность потока радона в подвалах все же испытывала крайне слабые сезонные колебания, коррелирующие с изменением скорости вращения Земли.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что временные колебания плотности потока радона с поверхности грунта связаны, прежде всего, с изменением проницаемости приповерхностного слоя грунта, в котором формируется поток радона в атмосферу. Строительство и эксплуатация зданий приводит к кардинальным изменениям температурного и влажностного режима грунтов основания, что обуславливает значительное различие между динамикой ППР с поверхности открытого грунта снаружи здания и с поверхности грунта под зданием, защищенной от осадков и температурных колебаний.

Вариации объемной активности радона в грунтовом воздухе. Анализ данных [4,5] показал, что характер вертикального распределения объемной активности (ОА) радона в подпочвенном воздухе определяется, прежде всего, распределением удельной активности радия в вертикальном про-

филе, а также проницаемостью грунтов. Последний фактор также существенно влияет на вариативность ОА радона в грунтовом воздухе.

Судя по полученным данным, перенос газов в слабопроницаемых суглинках Московской ЭП затруднен, поскольку их поровое пространство не представляет собой единой газодинамической системы. В такой ситуации любые изменения в небольшом объеме системы, например, изменение степени заполнения пор водой, могут привести к локальному, но существенному изменению радонного поля, для восстановления которого требуется относительно длительное время. В результате ОА радона на Московской площадке в глинистом слое подвержена незакономерным колебаниям, причины которых однозначно установить довольно сложно. Скорее всего, они связаны с неравномерным режимом увлажнения грунтов (колебаниями степени заполнения пор грунта водой). По крайней мере, в периоды формирования в глинистых отложениях верховодки, объемная активность радона в них существенно снижается. Не исключено, что могут иметь место и иные причины.

В хорошо проницаемых отложениях, где поровое пространство является единой газодинамической системой, изменения радонного поля в локальных ее участках быстро выравниваются

Табл.4. Распределение по глубине вариации объемной активности радона за период наблюдений.

Глубина, м	Московская	Рязанская	Екатеринбургская	Пятигорская	Иркутская "фоновая"
0,2	0,76	0,73	0,81	0,51	0,44
0,5	0,63	0,47	0,35	0,30	0,27
1-2	0,75	0,27 (0,15*)	0,32	0,15	—
2-3	0,66	0,14	0,41	0,12	0,18
3-4	0,41	0,12**	0,28**	0,13	0,24
4-10	0,30	0,14	—	0,21	0,19

* под изоляционным барьером; ** без учета периодов чрезмерного увлажнения или подтопления грунтов.

за счет поступления радона из соседних объемов системы, благодаря чему радоновое поле пронизуемых отложений более однородно. Наиболее существенные колебания радонового поля зарегистрированы на Рязанской и Екатеринбургской площадках в весенний период, в апреле–мае. Эти колебания связаны, прежде всего, с изменением уровня грунтовых вод и/или с формированием верховодки. При поднятии уровня грунтовых вод (или проникновении в массив инфильтрующихся дождевых вод) ОА радона в поровом пространстве грунта сначала повышается, как за счет «поршневого эффекта», т.е. выдавливания порового воздуха из нижележащих горизонтов, так и благодаря повышению степени заполнения пор водой. Затем, при полном обводнении грунта, судя по полученным результатам, происходит резкое снижение объемной активности радона в порах грунта*. Последующее осушение грунтов (при понижении уровня грунтовых вод) вызывает рост ОА радона до прежних значений.

В табл.4 приведены результаты обработки данных по мониторингу ОА радона в грунтовом воздухе, исключая периоды затопления массива грунтовыми водами.

Коэффициент вариации ОА радона характеризует колебания этой величины по отношению к ее среднему значению на данной глубине, т.е. относительную вариабельность ОА радона. Как видно из таблицы, на глубине 0,2 м на всех площадках ОА радона, также как и ППР, испытывает значительные временные колебания. Коэффициенты вариации находятся в интервале от 0,51 до 0,81. С глубиной эти вариации затухают, и становятся существенно ниже временных вариаций ППР с поверхности грунта.

В слабопроницаемых грунтах (Московская ЭП) значительные вариации ОА радона сохраняются до глубины 3,0 м включительно, на остальных площадках существенное затухание колебаний ОА радона, в основном, происходит уже на глубине 1,0–1,5 м. Объемная активность радона в поровом воздухе на глубине более 1 м на всех исследуемых площадках (кроме Московской ЭП) колеблется во времени незначительно (за исключением периодов обводнения массива). Коэффициент вариации не превышает 30 %, что сопоставимо с погрешностью определения данной величины. Это, вообще говоря, затрудняет достоверное выявление закономернос-

тей временных колебаний ОА радона на данных глубинах.

Анализ результатов мониторинга объемной активности радона в подпочвенном воздухе показывает, что в самом верхнем слое на глубинах 0,2 и 0,5 м, колебания ОА радона подчиняются практически тем же закономерностям, что и колебания ППР с поверхности грунта, только с обратным знаком. Факторы, вызывающие увеличение плотности потока радона, одновременно вызывают снижение ОА радона в поровом воздухе на глубине до 0,5 м. и наоборот. В результате на глубинах 0,2–0,5 м ОА радона проявляет более или менее значимую отрицательную корреляцию с плотностью потока радона с поверхности земли. Однако с увеличением глубины влияние на радоновое поле поверхностных факторов, перечисленных в предыдущем разделе, быстро снижается. Уменьшается и обратная корреляция между ППР и ОА радона в грунтовом воздухе. В табл.5 и на рис.7 представлено изменение коэффициента корреляции между ППР и объемной активностью радона в подпочвенном воздухе с увеличением глубины. Как видно из представленных материалов, на глубине 0,5 м на всех площад-

Табл.5. Коэффициент корреляции (r) между ППР и объемной активностью радона в подпочвенном воздухе на разных глубинах.

Московская ЭП		Екатеринбургская ЭП		Пятигорская ЭП	
Глубина, м	r	Глубина, м	r	Глубина, м	r
0,2	–0,21	0,2	–0,39	0,2	–0,3
0,5	–0,34	0,5	–0,48	0,5	–0,62
1,0	–0,05	1,0	–0,34	1,3	–0,50
2,0	–0,11	2,0	–0,10	1,9	–0,25
3,0	–0,06	3,0	–0,06	2,3	0,05
5,0	–0,02	4,5	–0,08	4,7	0,14
10,0	–0,03	–	–	–	–

* Следует отметить, что, строго говоря, мы пока не имеем возможности достоверно измерять ОА радона в поровой жидкости из-за неконтролируемой дегазации при отборе проб. Кроме того, возможно, результаты получаются заниженными из-за резкого подавления миграции радона из окружающего грунта в точку контроля со сборником радона.

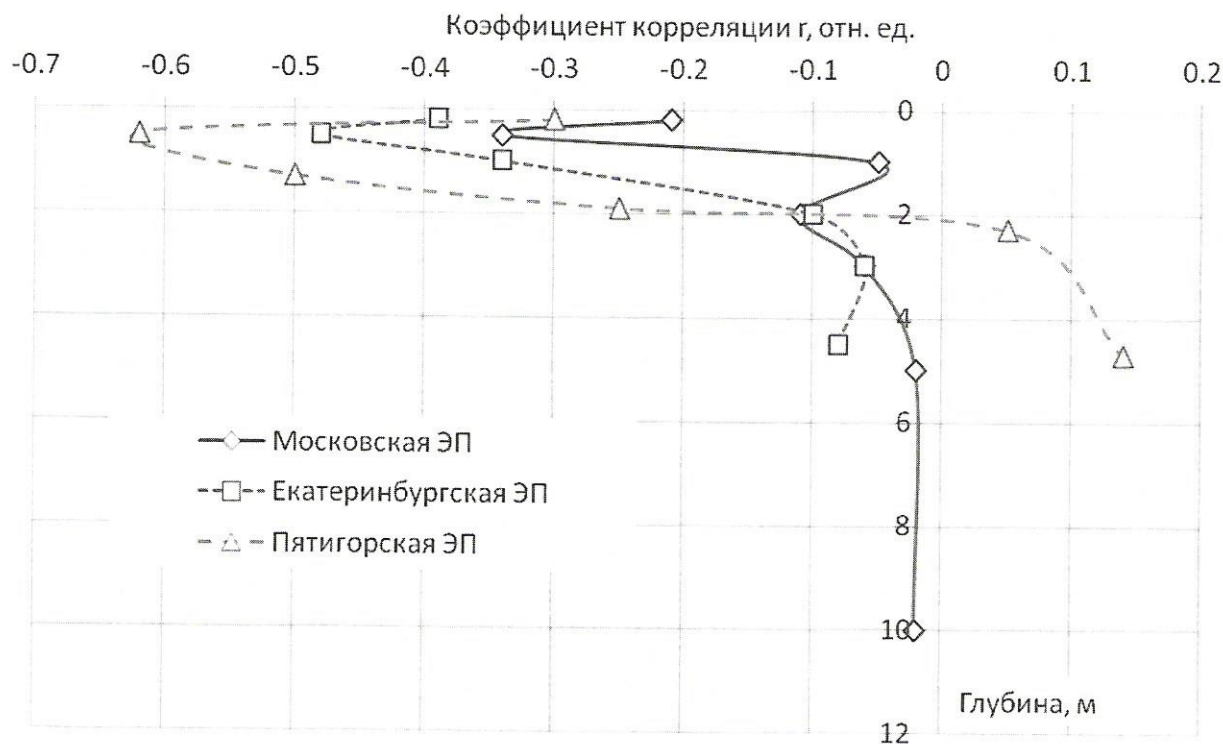


Рис.7. Изменение коэффициента корреляции между ППР и объемной активностью радона в подпочвенном воздухе с увеличением глубины.

как регистрируется максимальная обратная корреляция между плотностью потока радона с поверхности грунта и объемной активностью радона. Чем выше поток радона из грунтов, тем ниже его объемная активность в грунте на глубине 0,5 м, что вполне закономерно и объясняется выносом радона из этого слоя в атмосферу. Однако уже на глубине 2 м корреляция между этими параметрами практически исчезает.

Таким образом, на глубинах до 1,5 м колебания ОА радона подчиняются примерно тем же закономерностям, что и колебания ППР, рассмотренные выше. На глубинах более 1,5 м ярко выражена только взаимосвязь радонового поля с колебаниями уровня грунтовых вод. Других закономерностей временных колебаний объемной активности радона в грунтовом воздухе не установлено. В отличие от колебаний ППР, колебания ОА радона на глубинах более 1,5 м на каждой площадке

имеют индивидуальный характер, определяющийся, главным образом, гидрогеологическим режимом конкретного участка, глобальные корреляции между разными площадками отсутствуют. Отсутствует и корреляция ОА радона на этих глубинах со скоростью вращения Земли, не зарегистрировано связи с приливными явлениями и т.п. То есть, радоновое поле уже на глубине более 1,5 м слабо связано с поверхностными факторами, как локальными, так и планетарными.

Следует отметить, что в литературе встречаются упоминания о связи радонового поля с приливными явлениями [13] и др. геодинимическими процессами [10] на значительно больших глубинах (до десятков метров). Однако во всех подобных исследованиях анализировалась ОА радона в различного рода выработках (скважинах, шурфах, штольнях). То есть регистрировались колебания радонового поля системы «горная

выработка – вмещающий массив». Напряжения различной природы, возникающие в массиве, приводят к деформациям стенок горных выработок и, соответственно, изменению радоновыделения из стенок выработки в ее свободный объем. В данном случае сама система «выработка – массив» является своего рода деформационным датчиком. Этим, по нашему мнению, и объясняется регистрация на значительных глубинах корреляции колебаний радонового поля с приливными явлениями, скоростью вращения Земли и т.п. При мониторинге радона в геодинимических целях, такой подход к измерениям, скорее всего, является единственно правильным. Целью нашего эксперимента было выявление формирования радонового поля в ненарушенном грунтовом массиве, поэтому условия измерений были максимально приближены к природным. В ненарушенном массиве грунтов деформации различной природы быстро затухают

с увеличением глубины за счет растущей нагрузки от вышележащих слоев грунта (т.н. «бытового» давления), что, скорее всего, и обуславливает затухание с глубиной колебаний ОА радона и их связи с поверхностными факторами. Таким образом, деформации грунтов, наряду с изменением их влажности, выступают одним из важнейших факторов, определяющих колебания параметров радонового поля массива.

Выводы. Весь комплекс полученных данных свидетельствует о том, что в условиях фоновых радоновых полей (вне зон современной геодинамической активности) поток радона, регистрируемый на поверхности грунта, не является результатом дегазации недр. Радон поступает к поверхности непосредственно из грунтов активного слоя – специфической пограничной области грунтового массива, мощностью чаще всего не более 1,5 м, в которой происходит активный газообмен с атмосферой. Величина плотности потока радона с поверхности грунта определяется процессами газообмена между подпочвенным и атмосферным воздухом в активном слое и испытывает высокоамплитудные временные колебания. Наибольшее влияние на колебания радонового поля оказывают изменения проницаемости грунтов активного слоя, связанные как с локальными факторами, прежде всего, с колебаниями влажности и температуры грунтов, так и с глобальными, планетарными причинами, связанными с деформациями приповерхностного массива за

счет неравномерности вращения Земли и приливных эффектов.

Из-за существенных временных колебаний значения ППР, измеренные на одном и том же участке в разные моменты времени, могут то превышать уровень 80 мБк/м²с, то быть ниже его в зависимости от случайного сочетания факторов, что уже делает оценку радоноопасности по этому критерию неэффективной. Кроме того, плотность потока радона с поверхности грунта, измеренная до строительства, не отражает поток радона из грунтов основания в будущее здание, т.к. последний определяется свойствами грунтов и температурно-влажностными условиями, которые будут существовать под зданием. Таким образом, значение ППР с поверхности грунта, полученное в результате однократных измерений в случайный момент времени до начала строительных работ, не может применяться в качестве характеристики среднегодового поступления радона из грунтов основания в подземную часть проектируемого здания и, соответственно, не может использоваться как единственный критерий оценки потенциальной радоноопасности.

В то же время, как было показано ранее, на исследованных площадках (кроме Иркутской ЭП) стационарные распределения ОА радона в грунтовой среде, а также среднегодовые значения ППР из грунтов могут быть с удовлетворительной точностью рассчитаны на основе диффузионной модели переноса радона с применением относительно прос-

тых формул [5]. Это позволяет утверждать, что наиболее перспективным способом оценки потенциальной радоноопасности на участках с фоновым радоновым полем (вне зон, характеризующихся современной геодинамической активностью) является расчет среднегодового поступления радона в здание, исходя из известных значений удельной активности радия, коэффициента эмансирования и других радиационно-физических свойств грунтов. Данный подход полностью согласуется с концепцией радонового потенциала грунта, на которой основывается проектирование противорадовой защиты зданий [14].

В следующих публикациях данной серии будут более подробно представлены результаты исследований аномального радонового поля, проявляющегося в необычно высоком и нестабильном выделении радона с поверхности грунта. Такие условия наблюдались на территориях с высоким содержанием радия в грунте (Пятигорская ЭП), а также в зонах с проявлениями современной геодинамической активности (Иркутская ЭП). В заключительной статье, завершающей эту серию, будут предложены рекомендации по оценке радоноопасности участков строительства на основе обобщенного анализа результатов комплексных мониторинговых исследований формирования радоновых полей грунтовых массивов.

Литература (продолжение)

1. Маренный А.М., Пенезев А.В., Цапалов А.А., Микляев П.С. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 1 – программа и организация исследований. АНРИ №4(79), 2014. С.33-38.
2. Маренный А.М., Микляев П.С., Пенезев А.В., Цапалов А.А. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 2 – характеристики и оборудование экспериментальных площадок. АНРИ №2(81), 2015. С.15-26.
3. Маренный А.М., Микляев П.С., Пенезев А.В., Цапалов А.А., Климшин А.В., Маренный М.А., Петрова Т.Б., Шкуропат Д.И., Щелкунов А.Д., Янкин А.С. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 3 – результаты мониторинга плотности потока радона с поверхности грунта. АНРИ №2(81), 2015. С.27-41.
4. Маренный А.М., Микляев П.С., Пенезев А.В., Цапалов А.А., Климшин А.В., Лопатин М.Н., Маренный М.А., Петрова Т.Б., Шкуропат Д.И., Щелкунов А.Д., Янкин А.С. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 4 – результаты мониторинга радона внутри грунтовых массивов. АНРИ №3(82), 2015. С.52-63.
5. Маренный А.М., Микляев П.С., Пенезев А.В., Цапалов А.А. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 5 – результаты лабораторного определения радиационно-физических свойств грунтовых массивов. АНРИ №3(82), 2015. С.64-72.
6. Гулябянц Л.А., Заболоцкий Б.Ю. Сезонная вариация потока радона из грунта и оценка радоноопасности площади застройки. АНРИ №4(39), 2004. С.46-50.
7. Маренный А.М., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный М.А., Пенезев А.В., Козлова Н.В. Временные флуктуации плотности потока радона на территории Москвы. АНРИ №1(64), 2011. С.23-36.
8. Климшин А.В. и др. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле., 2010. № 2. Выпуск 16. С.146-151.
9. Климшин А.В., Антипин А.Н., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Цапалов А.А. Влияние уровня грунтовых вод на перенос радона в почвенном воздухе на полигоне в Екатеринбурге. АНРИ №2(77), 2014. С.45-52.
10. Рудаков В.П. Эманионный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир, 2009. 176 с.
11. Селюков Е.И., Стигнеева Л.Т. Краткие очерки практической микрогеодинамики. СПб.: Питер, 2010. 176 с.
12. International Earth Rotation and Reference Systems Service. <http://www.iers.org>.
13. Спивак А.А. Объемная активность подпочвенного радона в зонах тектонических нарушений. Геофизика межгеосферных взаимодействий. Ин-т динамики геосфер РАН. М.: ГЕОС, 2008. С.235-246.
14. Гулябянц Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. М.: ИО «ФЭН-НАУКА», 2013. 52 с.

The Comprehensive Monitored Research of the Formation of the Radon Fields in the Massifs of Soil.

Part 6. The Analysis of Regularities of Temporal Variations of the Radon Fields

A.M.Marennyy¹, P.S.Miklyaev^{1,2}, A.A.Tsapalov¹, A.V.Klimshin³, T.B.Petrova⁴, A.V.Penezev¹

¹Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Moscow, Russia; ²Sergeevs Institute of Environmental Geoscience, Moscow, Russia; ³Institute of Geophysics, Ural branch of RAS, Ekaterinburg, Russia; ⁴Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of analysis of long-term monitoring of radon flow rate from soil surface and radon activity concentration in the soil pores at the experimental sites located in the open areas and in the basements of buildings in Moscow, Ryazan region, Yekaterinburg, Pyatigorsk and Irkutsk. On the basis of this analysis were obtained factors that determine the formation of the radon fields in the massifs of soil and identified basic regularities of temporary fluctuations of radon field parameters.

Key words: radon, radon monitoring, radon flow rate, radon activity concentration in the soil gas, experimental site.

А.М.Маренный (д.ф.-м.н., с.н.с., зав.лаб.), А.А.Цапалов (к.т.н., с.н.с.), А.В.Пенезев (в.н.с.) – ФГУП Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, г.Москва; П.С.Микляев (к.г.-м.н., в.н.с.) – ФГБУН Институт геоэкологии им.Е.М.Сергеева РАН, г.Москва; А.В.Климшин (к.т.н., н.с.) – ФГБУН Институт геофизики им.Ю.П.Булашевича УрО РАН, г.Екатеринбург; Т.Б.Петрова (к.т.н., с.н.с.) – ФГБОУ ВО МГУ им.М.В.Ломоносова, г.Москва.

Контакты: тел.: +7 (499) 193-11-02; e-mail: amarennyy@yandex.ru.

Контакты для оперативной связи: Петр Микляев peterm7@inbox.ru; тел.: +7 (926) 135 95 63.