

УДК 546.027:550.42:546.296

ВАРИАЦИИ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА В ТРАДИЦИОННЫХ ДЕРЕВЕНСКИХ ДОМАХ

© 2020 г. П. С. Микляев^{1,*}, Т. Б. Петрова²¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия² МГУ им. М.В. Ломоносова, химический ф-т, Москва, Россия

*E-mail: peterm7@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.03.2018 г.

В целях оценки временной вариабельности концентрации радона в помещениях традиционных деревенских домов были проведены непрерывные измерения объемной активности радона в помещениях двух домов, расположенных в западной части Московской области (Можайский и Истринский районы) в августе 2017 г., в июле–августе 2018 г. и в феврале–марте 2019 г. Летом 2017 г. одновременно выполнялись непрерывные измерения плотности потока радона с поверхности грунта рядом с домом. Установлено, что характер вариаций концентрации радона в помещении зависит от сезона. В летний период объемная активность радона в деревенских домах подвержена сильным суточным колебаниям, которые характеризуются максимумами ночью и минимумами днем. Концентрация радона прямо пропорциональна перепаду температур внутри и вне помещения и обратно пропорциональна скорости ветра. Зимой концентрация радона в помещении была в среднем в 3 раза выше, чем летом, и изменялась обратно пропорционально перепаду температур внутри и вне помещения, суточные колебания отсутствовали. Независимо от сезона такие факторы как плотность потока радона с поверхности грунта, а также режим эксплуатации помещений (проветривание) практически не влияют на концентрацию радона в деревенских домах.

Ключевые слова: вариации радона, концентрация радона в помещениях, плотность потока радона из грунта, стек-эффект

DOI: 10.31857/S0869803120010117

Оценка радонового риска — одна из важнейших составляющих обеспечения радиационной безопасности населения. Анализ результатов многолетних исследований связи рака легкого с облучением радоном в жилищах [1–3] показал, что радон является ведущим канцерогенным фактором, уступающим по значимости лишь курению. Оценка радонового риска проводится на основе данных об экспозиции населения радоном, представляющей собой функцию от средней концентрации радона и времени нахождения человека в помещении. Считается, что риск наступает в результате достаточно длительного (~25 лет) периода экспозиции [4]. Основным источником неопределенности при оценке радонового риска является существенная временная вариабельность объемной активности радона в помещениях. Этот фактор может приводить к существенному смещению результата оценки риска, особенно в случае использования “мгновенных” методов измерения объемной активности радона. В этой связи во всем мире активно проводятся исследования, направленные на выявление закономерностей временных вариаций объемной активности радона в помещениях [5–12]. Основной при-

чиной вариабельности объемной активности радона в помещениях считают изменение интенсивности воздухообмена в здании, в том числе за счет изменения режима проветривания помещений. В этой связи важным фактором считается режим эксплуатации зданий: в неэксплуатируемых зданиях при закрытых окнах и дверях обычно ожидаются более высокие абсолютные значения и меньшая вариабельность концентрации радона, чем в условиях обычной эксплуатации помещения, в условиях постоянного или периодического проветривания. Частота проветривания помещений зависит, в свою очередь, от сезона, а также от привычек жителей. Повышенные концентрации радона ожидаются также в домах, построенных с применением энергосберегающих технологий [13]. Вместе с тем ряд более ранних исследований показал отсутствие корреляции между вариациями скорости воздухообмена и концентрации радона в помещениях [14].

Следует отметить, что за рубежом основным объектом исследований всегда были многоквартирные частные дома. Многоэтажные городские здания признаются слишком сложным объектом

для исследований. Для западных стран это во многом оправдывается структурой жилого фонда, в которой многоквартирные дома преобладают. В России сложилось так, что доля многоэтажных зданий в радоновых исследованиях всегда была существенной [7–9], в то время как деревянные сельские дома – традиционные русские избы – в этом отношении исследованы слабее. Вместе с тем традиционные русские деревянные дома широко распространены в сельской местности и частном секторе многих городов. Доля деревянных домов в структуре жилого фонда России составляет 53% от общего количества индивидуальных зданий. По общей жилой площади (индивидуальные и многоквартирные дома) деревянные дома составляют около 18% жилищного фонда России [15]. В летний период доля жителей деревянных домов, основную часть которых составляют дети, существенно возрастает в связи с дачным сезоном. В то же время одноэтажные сельские дома при одинаковом геогенном радоновом потенциале территории характеризуются значительно большими концентрациями радона по сравнению с городскими [16]. В этой связи исследование поведения радона в традиционных деревянных домах представляется весьма актуальным. Кроме того, простая конструкция одноэтажных деревянных домов, характеризующихся практически беспрепятственным проникновением радона из грунтового основания в жилое помещение, а также отсутствием выделения радона из строительных материалов, делают их, можно сказать, эталонным объектом для изучения закономерностей поступления радона в помещения из грунтового основания.

Известно, что основным источником поступления радона в помещения является грунт в основании здания [14]. Величины, характеризующие потенциальное выделение радона из грунта – объемная активность радона в грунтовом газе и плотность потока радона с поверхности грунта – также испытывают значительные временные колебания. Временная вариабельность этих параметров характеризуется сезонной и суточной периодичностью, а также спонтанными всплесками [17–21]. Вариации плотности потока радона из грунтов основания также могут быть причиной колебаний концентрации радона внутри помещений. В этой связи возникает вопрос о вкладе вариаций потока радона из грунтов в наблюдаемые колебания концентрации радона в зданиях. Следует отметить, что в России плотность потока радона с поверхности грунта на участках строительства новых зданий регламентируется санитарными правилами [22]. Таким образом, в отечественной системе радиационно-гигиенического нормирования плотность потока радона с поверхности открытого грунта достаточно жестко связана с ожидаемыми значениями концентрации радона в

проектируемом здании. Однако на данный момент характер связи между наблюдаемыми концентрациями радона в помещениях и интенсивностью выделения радона из геологической среды изучен недостаточно. Очевидно, что концентрация радона в здании должна определяться двумя основными факторами: а) изменением интенсивности поступления радона из грунтов под зданием и б) режимом воздухообмена в помещениях. Возникает вопрос, какой вклад вносит каждый из перечисленных факторов в радоновый баланс здания? Какой процесс в большей степени влияет на вариации радона в зданиях, и в каких условиях? Анализ литературы показывает, что на этот вопрос пока нет четкого ответа. Мало того, непрерывных долговременных измерений объемной активности радона в здании и одновременно скорости выделения радона из грунта в литературе практически не представлено, за исключением классической пионерской работы [23] и единичного отечественного исследования [24].

В этой связи нами была поставлена задача проведения мониторинга, включающего непрерывные измерения объемной активности радона в традиционных деревянных сельских домах, при этом в одном случае параллельно проводился также непрерывный мониторинг плотности потока радона с поверхности грунта рядом с домом с целью уточнения закономерностей поступления радона из грунта в здание.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в Московской области в дер. Троица Можайского района (дом 1950-х годов постройки) и в дер. Алехново Истринского района (дом построен в начале XX в.). Измерения проводились в традиционных русских деревенских одноэтажных домах (избах) похожей конструкции, представляющих собой бревенчатый сруб с большими сенями и пристроенными застекленными террасками. Оба дома стоят на ленточном кирпичном фундаменте, имеют подпол, высотой около 0.8 м. Грунт в подполах обоих домов – слабопроницаемый покровный суглинок. Подпол с земляным основанием заглублен примерно на 0.3 м ниже уровня земли, пол в избах дощатый, поднят над поверхностью земли приблизительно на 0.5 м. Внутренняя площадь обоих бревенчатых срубов, где проводились измерения, составляет 25 м² (5 × 5 м), высота потолка 2.3–2.6 м. Проветривание помещений в обоих избах осуществляется с помощью входной двери и одного, расположенного напротив, открывающегося окна (в остальных окнах были установлены земные двойные рамы). Входные двери в избы утеплены, выходят в сени. Обе избы хорошо теплоизолированы, в результате чего в жаркие дни в них долго сохраняется прохлада, а в ночные часы – тепло.

Отопление домов разное, хотя традиционные русские печи в обоих случаях разобраны. В дер. Троица Можайского района сруб отапливается небольшой железной печкой, которая растапливалась только в прохладную погоду преимущественно по вечерам. Дом в дер. Алехново Истринского района оборудован системой отопления с газовым котлом. Отопление работает постоянно и выключалось только в жаркую погоду. В доме поддерживалась постоянная температура 18–22°C (зимой в отсутствие жителей 8–10°C). Оба дома – жилые, в период проведения мониторинга помещения эксплуатировались в обычном режиме. Летом в домах жили постоянно, периодически в обоих случаях жители уезжали в город, и дома на некоторое время (от 3 до 10 дней) оставались пустыми, с закрытыми окнами и дверями. Зимой жители приезжали только по выходным дням, в остальное время дом стоял закрытым, мощность отопительного котла снижалась до минимального уровня.

В дер. Троица Можайского района мониторинговые исследования проводились в период с 14 по 31 августа 2017 г. Измерения были организованы по следующей схеме. Мониторинг концентрации (объемной активности) радона в помещении проводился с помощью радиометра радона Radon Scout Plus (РГА-1100 Плюс) фирмы SARAD GmbH (Германия). Прибор позволяет в течение длительного времени автоматически регистрировать концентрацию радона в помещении каждый час с записью результатов во встроенной энергонезависимой памяти. Диапазон измерений объемной активности (ОА) радона в воздухе составляет 0–10 МБк/м³. Погрешность измерений составляет 20% (1σ) при значениях ОА радона 200 Бк/м³ в измерительном интервале 1 ч. Кроме концентрации радона прибор также позволяет ежечасно регистрировать температуру, относительную влажность воздуха и атмосферное давление в помещении. Радиометр радона в течение всего эксперимента был установлен на высоте 1 м на столе в центре жилого помещения (бревенчатого сруба).

Параллельно на участке в непосредственной близости от дома была организована площадка (2 × 2 м), где проводился непрерывный мониторинг плотности потока радона с поверхности грунта в трех контрольных точках. Контрольные точки представляли собой неглубокие лунки со снятым дерновым покровом, расположенные в вершинах равностороннего треугольника с ребром 1.5 м. Измерения плотности потока радона проводились с помощью метода открытой камеры с активированным углем. Суть метода, его преимущества и недостатки подробно описаны в работах [19, 25]. Смену накопительных камер в контрольных точках проводили каждые 4 ч. По-

сле экспонирования уголь из камер пересыпался в герметичные колонки и выдерживался в течение 3 ч для установления радиоактивного равновесия между радоном и его короткоживущими продуктами распада. Измерение активности радона в угле проводили по регистрации β-излучения продуктов распада радона радиометром β-частиц с блоками детектирования БДБ-13, входящего в состав измерительного комплекса для мониторинга радона “КАМЕРА-01” (НТЦ “НИТОН”, Россия). Среднюю плотность потока радона с поверхности грунта за время экспонирования камер определяли как функцию активности радона в угле, площади накопительной камеры и времени ее экспонирования. Диапазон измерений плотности потока радона составляет от 3 до 100 000 мБк/(м² с). Относительная погрешность измерения не превышает 30% (2σ). Смену накопительных камер в контрольных точках производили в одно и то же время суток приблизительно в 0:00, 4:00, 8:00, 12:00, 16:00 и 20:00, иногда с небольшими отклонениями. По результатам измерений, полученным в трех точках, определяли среднее арифметическое, которое и использовали как значение плотности потока радона с поверхности грунта на экспериментальной площадке. Каждые 4 ч, в момент смены накопительных камер, на площадке также определяли влажность почвы (качественно) с помощью садового почвенного влагомера “Moisture”, и температуру воздуха на высоте 2 м от поверхности земли с помощью стеклянного спиртового термометра F + R80.

В дер. Алехново Истринского района проводили только мониторинг объемной активности радона и микроклиматических параметров в помещении с применением радиометра радона Radon Scout Plus (РГА-1100 Плюс) фирмы SARAD GmbH (Германия). Радиометр радона, так же как и в предыдущем случае, в течение всего эксперимента был установлен на высоте 1 м на столе в центре жилого помещения (бревенчатого сруба). Измерения проводились в летнее время в период с 02 июля по 25 августа 2018 г., и зимой в течение трех недель в период с 9 февраля по 3 марта 2019 г.

На обоих участках была измерена удельная активность естественных радионуклидов в грунтах основания домов с применением полевого γ-спектрометра СКС-99 “Спутник”, со сцинтилляционным блоком детектирования. Блок детектирования помещали в шпур на глубину 0.5 м от поверхности (геометрия измерений 4л). Удельная активность радионуклидов в грунтах представлена в табл. 1.

При анализе метеорологических параметров (температура воздуха, атмосферное давление, количество осадков, скорость ветра) использовали данные метеорологической станции “Можайск”, расположенной в 17 км от дер. Троица и “Ново-

Таблица 1. Удельная активность радионуклидов в грунтах основания исследуемых домов
Table 1. Specific activity of radionuclides in the soils of the studied houses base

Местоположение	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг			
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
Дер. Троица	43 ± 8	20.5 ± 3.5	555 ± 84	<5
Дер. Алехново	38 ± 7	24 ± 5	680 ± 110	<8

Иерусалим”, в 13 км от дер. Алехново. Информация предоставлена сайтом “Расписание Погоды”, гр5.ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывают полученные результаты, объемная активность радона в деревенских домах подвержена существенным временным вариациям как периодического, так и непериодического характера. В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции между концентрацией радона в помещении (C_{Rn}) и колебаниями метеорологических факторов, такими как температура атмосферного воздуха вне помещения (T_a), перепад температур внутри и вне помещения (ΔT), атмосферное давление (Pa) и скорость ветра (V_a). В последнем столбце приведен коэффициент корреляции между объемной активностью радона в помещении и плотностью потока радона с поверхности грунта (J_{Rn}), для дер. Троица (в дер. Алехново измерения плотности потока радона не проводили). Как видно из таблицы, концентрация радона в помещениях деревенских домов проявляет значимую корреляцию, прежде всего с параметрами, определяющими воздухообмен в здании, такими как перепад давлений внутри и вне помещения и скорость ветра, в то время как корреляция с плотностью потока радона из грун-

та отсутствует. Последнее хорошо иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 1, из которого видно, что вариации объемной активности радона в помещении деревенского дома не связаны с колебаниями скорости выделения радона из грунтов.

Временные вариации объемной активности радона, зарегистрированные в летний период 2017 г. (дер. Троица) и 2018 г. (дер. Алехново), характеризуются весьма близкой структурой и кардинально отличаются от вариаций, наблюдаемых в зимний период, что проиллюстрировано на рис. 2, а также в табл. 3.

Летом наблюдается четкий суточный ритм колебаний концентрации радона в помещениях с максимумами в ночные и утренние часы и минимумами во второй половине дня. Анализ суточных колебаний, усредненных за весь период наблюдений (рис. 3), показывает, что в период примерно с 8:00 до 13:00 происходит достаточно резкий спад C_{Rn} , после активность радона остается низкой вплоть до 20:00, когда вновь начинается ее плавный рост. Предположение, что данный характер суточных колебаний C_{Rn} связан с режимом проветривания помещения (днем окна и двери, как правило, открыты, а ночью – закрыты), не подтвердилось. Во-первых, в большинстве случаев время начала снижения концентрации радона в помещении значительно раньше, чем время пробуждения и начала активной деятельности жильцов дома. Во-вторых, в период с 25 по 27 августа 2017 г., а также в период с 1 по 10 августа 2018 г. в домах жильцы отсутствовали, окна и двери были закрыты, проветривания не происходило, однако это никак не повлияло на характер колебаний радона в помещении (см. рис. 1 и рис. 4).

Вместе с тем рост и спад объемной активности радона тесно связаны с изменением соотношения между температурой воздуха внутри и вне помещения (рис. 3). Падение концентрации радона в утренние часы начинается после того, как темпе-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между объемной активностью радона в домах и метеорологическими параметрами, а также плотностью потока радона из грунтов

Table 2. Correlation coefficients between the indoor radon concentration and meteorological parameters, as well as the radon flux density from soil surface

Место наблюдений	Период наблюдений	Число наблюдений	Коэффициент корреляции между объемной активностью радона и следующими параметрами				
			T_a	ΔT	Pa	V_a	J_{Rn}
Дер. Троица	14–31.08.2017	108	-0.42	0.58	0.08	-0.54	-0.12
Дер. Алехново	2.07–25.08.2018	324	-0.56	0.7	0.19	-0.63	–
	9.02–3.03.2019	138	-0.21	-0.6	-0.28	-0.19	–

Примечание. T_a – температура атмосферного воздуха вне помещения, ΔT – перепад температур внутри и вне помещения, Pa – атмосферное давление, V_a – скорость ветра, J_{Rn} – плотность потока радона с поверхности грунта; жирным шрифтом выделены значения коэффициента корреляции более 0.5 ($p = 0.01$).

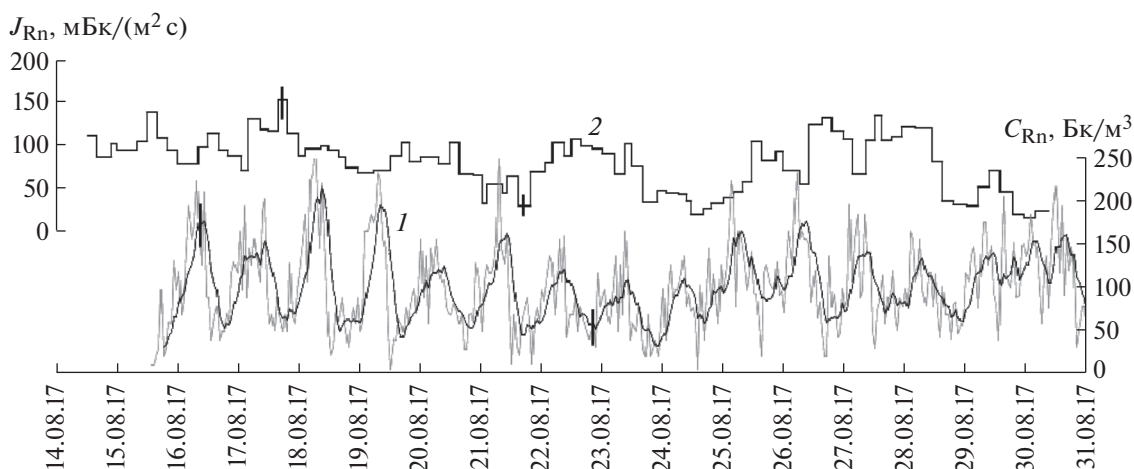


Рис. 1. Результаты одновременных измерений объемной активности радона в доме (1) и плотности потока радона с поверхности грунта (2) в дер. Троица.

Fig. 1. Results of simultaneous measurements of indoor radon concentration (1) and radon flux density from the ground surface (2) in the Troitsa village.

ратура воздуха на улице становится выше, чем в доме (перепад температур внутри и вне помещения принимает отрицательные значения), и наоборот, постепенный рост концентрации радона вечером начинается после того, как перепад температур становится положительным. Кроме того, дневной спад концентрации радона в помещении совпадает с увеличением скорости ветра. Оба эти параметра – перепад температур и скорость ветра – обуславливают явление теплового и ветрового напора на оболочку здания, определяющего воздухообмен в помещении.

Описанное выше соотношение между C_{Rn} и ΔT указывает на существование в ночные часы так называемого “стек-эффекта” или эффекта “дымовой трубы”, который обуславливает поступление радона из подпола (из грунтов основания здания). Этот эффект, возникающий за счет теплового напора на оболочку здания, известен в качестве одной из основных причин формирования повышенной концентрации радона в домах в холодные периоды, когда температура воздуха в помещении выше, чем снаружи [26–29]. Ночью

за счет перепада температур более теплый воздух внутри помещения поднимается вверх и выходит наружу через окна, щели, дымовую трубу. В результате в нижней части помещения создается пониженное давление относительно наружного пространства, что приводит к поступлению в помещение воздуха, обогащенного радоном, из подпола и грунтов основания здания через щели в полу. Днем, когда температура воздуха в доме становится ниже, чем окружающая атмосфера, поступление радона из подпола прекращается. Отрицательный перепад температур внутри и вне здания, а также действие ветрового напора приводят к поступлению в помещение воздуха из окружающей атмосферы и соответственно снижению концентрации радона.

Перечисленные факторы определяют не только суточные, но и более длительные колебания объемной активности радона в помещении. Среднесуточные значения объемной активности радона в помещении также тесно связаны со среднесуточным перепадом температур внутри и вне помещения. Так, во второй половине июля

Таблица 3. Результаты радонового мониторинга на экспериментальных площадках
Table 3. Results of continuous radon measurements at experimental sites

Место измерений	Период измерений	Объемная активность радона (C_{Rn}), Бк/м ³				
		\bar{X}	σ	\tilde{X}	ϵ	min–max
Дер. Троица	14–31.08.2017	92	53	86	1.8	<5–275
Дер. Алехново	2.07–25.08.2018	75	45	66	2.0	<5–249
	9.02–3.03.2019	233	96	212	1.6	50–471

Примечание. \bar{X} – среднее арифметическое, σ – стандартное отклонение, \tilde{X} – среднее геометрическое, ϵ – геометрический стандарт (геометрическое стандартное отклонение), min–max – диапазон колебания.

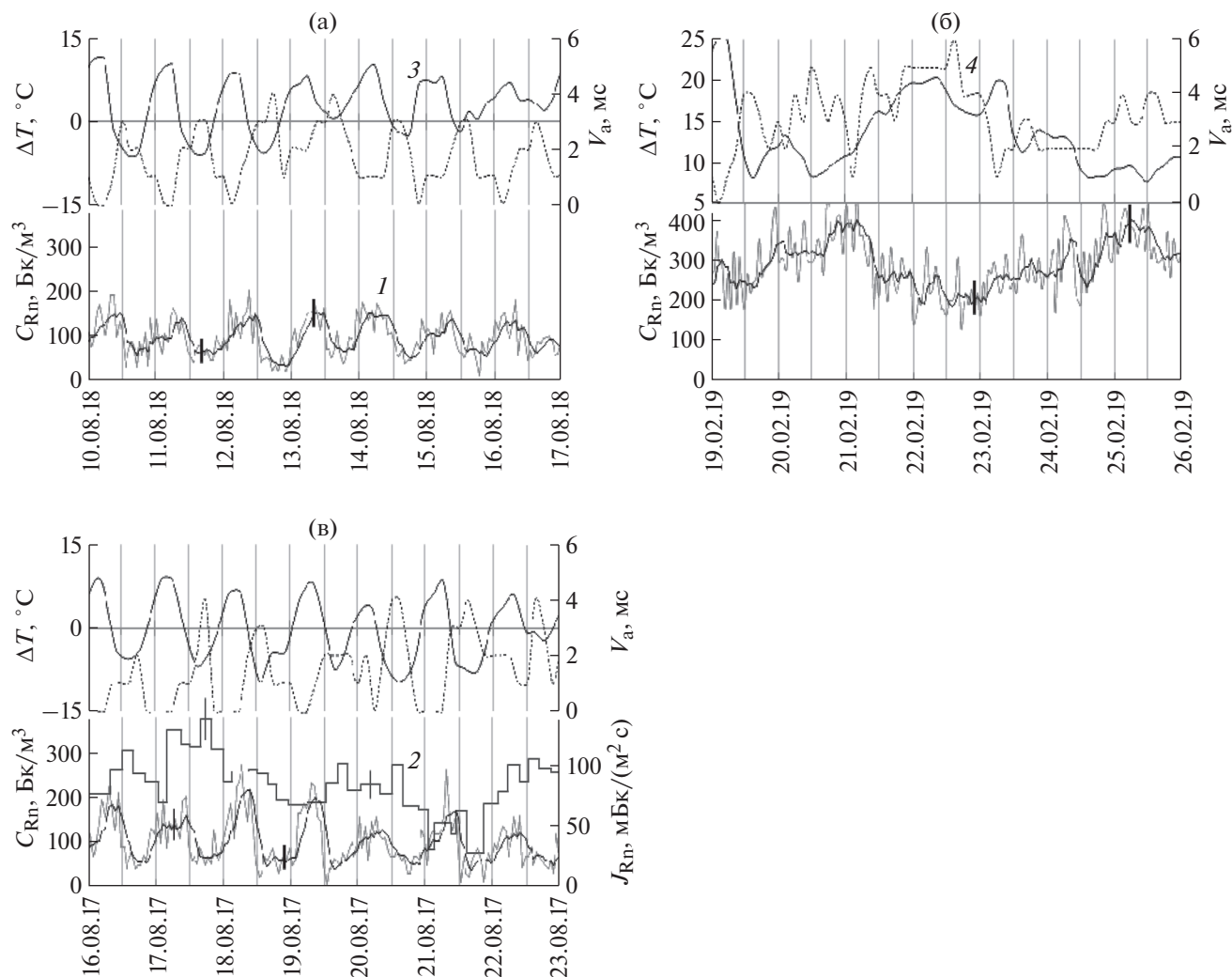


Рис. 2. Фрагменты временных рядов непрерывных измерений объемной активности радона в помещениях традиционных деревянных домов в дер. Алехново летом 2018 г. (а) и зимой 2019 г. (б), а также в дер. Троица летом 2017 г. (в): 1 – объемная активность радона в помещении, 2 – плотность потока радона с поверхности грунта, 3 – перепад температур внутри и вне помещения, 4 – скорость ветра.

Fig. 2. Fragments of time series of indoor radon continuous measurements in the traditional wooden houses in Alekhново village in the summer of 2018 (a) and winter 2019 (б), and also in the Troitsa village in the summer of 2017 г. (в): 1 – the indoor radon concentration, 2 – the radon flux density from the ground surface, 3 – the difference between inside and outside temperature, 4 – wind speed.

2018 г. (см. рис. 4), в жаркую погоду, когда среднесуточный перепад температур принимал преимущественно отрицательные значения, концентрация радона в помещении снизилась вплоть до нулевых значений. В этот же период наблюдались наибольшие значения скорости ветра, что, по-видимому, также способствовало снижению концентрации радона. При положительных значениях перепада температур внутри и вне помещения среднесуточные значения концентрации радона вновь увеличивались.

В зимний период как характер временных вариаций, так и абсолютные значения концентрации радона в помещении существенно отличаются

от летних (табл. 3, рис. 2, 3). Зимой концентрация радона в помещении существенно (в 3 раза) выше, чем летом, а суточные колебания отсутствуют. Вариации объемной активности радона характеризуются периодом около 4–5 сут и тесно связаны с колебаниями перепада температур внутри и вне помещения, однако корреляция между этими показателями не прямая, как летом, а обратная. Значимого влияния других метеорологических факторов не обнаруживается.

Обратная корреляция между C_{Rn} и ΔT свидетельствует о том, что зимой перепад давлений, обусловленный “стек-эффектом”, вызывает подсос в помещение воздуха из атмосферы. Одновременно

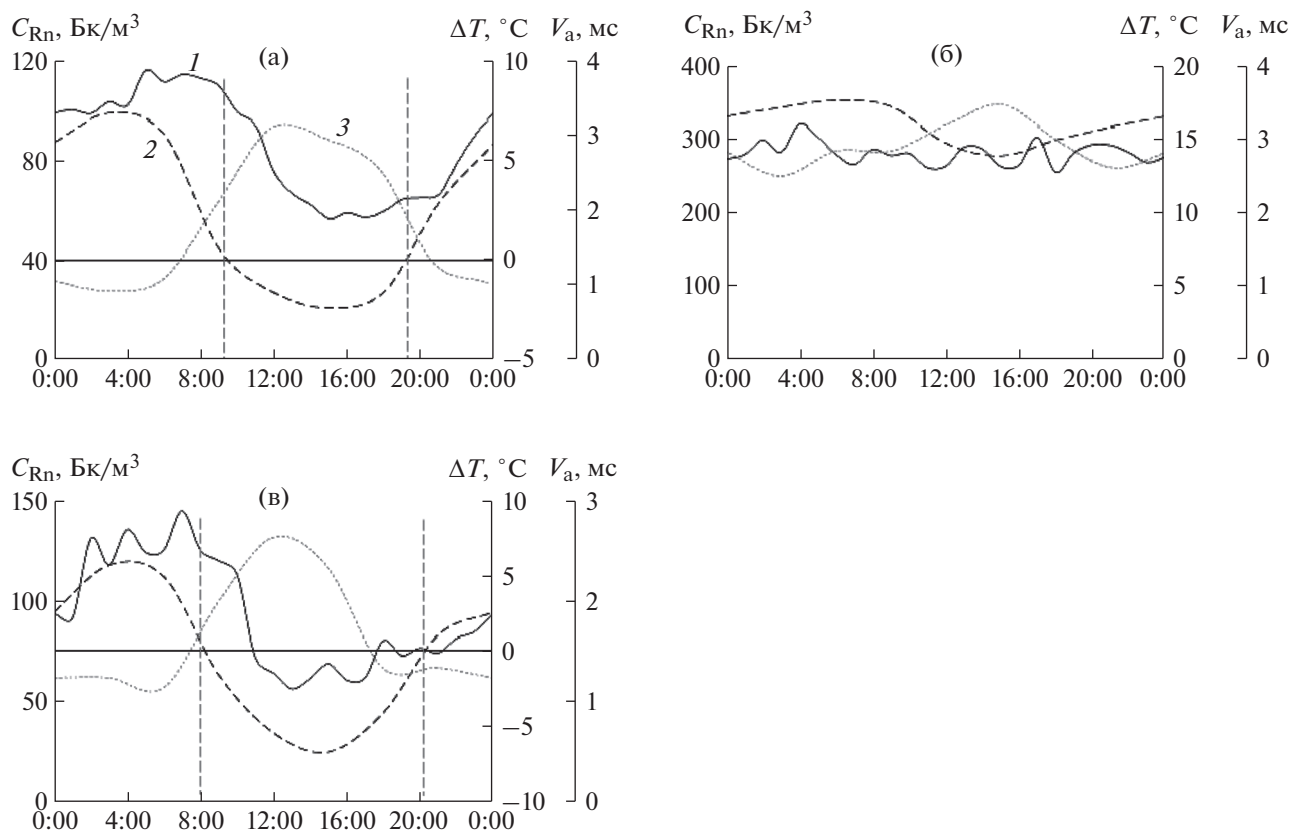


Рис. 3. Суточные колебания объемной активности радона, усредненные за весь период наблюдений, в помещениях традиционных деревянных домов в дер. Алехново летом 2018 г. (а) и зимой 2019 г. (б), а также в дер. Троица летом 2017 г. (в): 1 – объемная активность радона в помещении, 2 – перепад температур внутри и вне помещения, 3 – скорость ветра.

Fig. 3. Diurnal variations of indoor radon concentrations averaged over the entire observation period in the Alekhново village in the summer of 2018 (a) and winter 2019 (б), and also in the Troitsa village in the summer of 2017 (в): 1 – indoor radon concentration, 2 – the difference between inside and outside temperature, 3 – wind speed.

менно высокие концентрации радона в помещении свидетельствуют о значительном поступлении радона из грунтов основания (других источников радона в деревянном доме нет). Можно предположить, что, по мере увеличения перепада температур внутри и вне помещения, сначала в помещение поступает в основном воздух из подпола, что ведет к повышению концентрации радона (корреляция между C_{Rn} и ΔT положительная). Однако при достаточно высоких значениях ΔT подъемная сила воздуха увеличивается настолько, что начинается подсос воздуха в жилое помещение не только из подпола, но и из окружающей атмосферы. С этого момента дальнейшее увеличение перепада температур приводит к относительному снижению концентрации радона в помещении, и корреляция между этими показателями становится обратной. Однако для обоснования данного предположения необходимы более длительные наблюдения.

Следует отметить, что наблюдаемая нами закономерность (увеличение концентраций радона

в помещении ночью и в холодный период) характерна для зданий, в которых присутствует прямая пневматическая связь между грунтовым основанием и жилыми помещениями и где площадь основания велика по сравнению с общим объемом здания, что характерно для традиционных деревянных домов. Очевидно, что наличие герметичного барьера между подполом и жилым помещением позволило бы предотвратить подток воздуха из подпола и соответственно не допустить роста концентрации радона в помещении. Известно, что в случае, когда подземная часть здания надежно изолирована от надземной, или при незначительной площади основания здания по сравнению с его общим объемом (например, в многоэтажных зданиях), концентрации радона в зимний период часто ниже, чем летом [7, 24, 30]. Это объясняется тем, что перепад давления вне и внутри здания в этих случаях приводит к поступлению в помещения преимущественно наружного воздуха через неплотности в оболочке здания и окна на нижних этажах. В таких случаях значи-

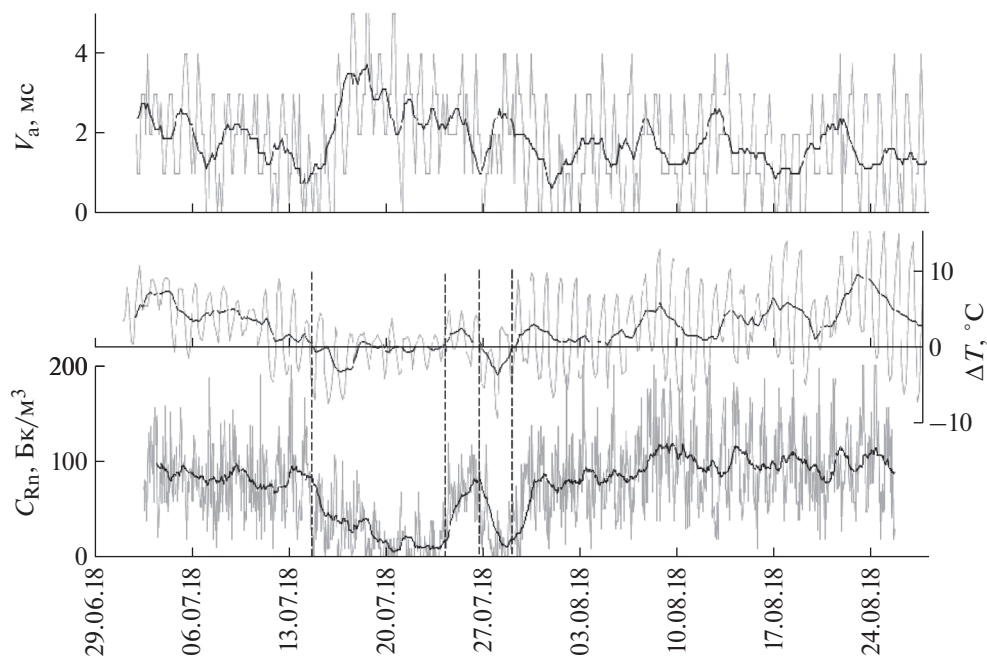


Рис. 4. Вариации скорости ветра, перепада температур внутри и вне помещения и объемной активности радона в помещении деревянного дома в дер. Алехново летом 2018 г. (жирная линия – среднесуточные значения).

Fig. 4. Variations of wind speed, difference between inside and outside temperature, and indoor radon concentration in the wooden house in the Alekhново village in the summer of 2018 (thick line – daily average values).

тельно большой вклад в вариации концентрации радона вносят эффект ветрового напора и режим проветривания [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что характер колебаний концентрации радона в традиционных русских деревенских домах существенно зависит от сезона. В летнее время вариации объемной активности радона характеризуются очень четко выраженной суточной составляющей с максимумами в утренние часы и минимумами во второй половине дня, связанной с суточной инверсией перепада температур внутри и вне помещения, а также изменением скорости ветра. Более длительные вариации радона связаны с этими же факторами. В жаркую погоду, когда среднесуточные значения перепада температур принимают отрицательные значения, наблюдается существенное снижение концентраций радона вплоть до нулевых значений. Для летнего времени характерно наличие прямой корреляции между объемной активностью радона в помещении и перепадом температур внутри и вне помещения и обратной корреляции со скоростью ветра.

Зимой в отапливаемых домах наблюдаются более высокие концентрации радона, чем летом, а суточные колебания отсутствуют. В качестве ос-

новного фактора, определяющего вариации объемной активности радона, выступает также перепад температур внутри и вне помещения, однако между этими параметрами наблюдается не прямая, а обратная корреляция.

Такие факторы как изменение эксхалляции радона из грунтов основания и режим эксплуатации (проветривания) помещения на концентрацию радона в традиционных деревенских домах заметного влияния не оказывают.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0142-2019-0025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Darby S., Hill D., Auvinen A. et al.* Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe // *Scand. J. Work, Environ. Health.* 2006. V. 32. Suppl. 1. P. 1–83.
2. *Krewski D., Lubin J.H., Zielinski J.M. et al.* Residential Radon and Risk of Lung Cancer: A Combined Analysis of 7 North American Case-Control Studies // *Epidemiology.* 2005. V. 16. P. 137–145.

3. *Lubin J.H., Wang Z.Y., Boice J.D. et al.* Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies // *Int. J. Cancer*. 2004. V. 109. P. 132–137.
4. *Онищенко А.Д., Жуковский М.В.* Роль искажающих факторов в радоновом эпидемиологическом исследовании // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10. № 1. С. 65–75. [*Onishchenko A.D., Zhukovskij M.V.* Rol' iskazhayushchih faktorov v radonovom epidemiologicheskom issledovanii // *Radiacionnaya gigiena*. 2017. T. 10. № 1. S. 65–75. (In Russian)]
5. *Barros N., Steck D., Field R.* Utility of short-term basement screening radon measurements to predict year-long residential radon concentration on upper floors // *Radiat. Protect. Dosim.* 2016. V. 171. № 3. P. 405–413.
6. *Burke Q., Murphy P.* Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels // *Radiat. Meas.* 2011. V. 46. № 10. P. 1168–1172.
7. *Tsapalov A., Kovler K.* Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation // *J. Environ. Radioact.* 2018. V. 183. P. 59–72.
8. *Васильев А.В., Жуковский М.В.* Характер и периодичность изменения объемной активности радона в помещении // *АНРИ*. 2015. № 2. С. 42–47. [*Vasil'ev A.V., Zhukovskij M.V.* Charakter i periodichnost' izmeneniya ob'emnoj aktivnosti radona v pomeshchenii // *ANRI*. 2015. № 2. S. 42–47. (In Russian)]
9. *Маренный А.М., Романов В.В., Астафуров В.И. и др.* Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8. № 1. С. 23–29. [*Marennyy A.M., Romanov V.V., Astafurov V.I. i dr.* Provedenie obsledovanij zdaniy razlichnogo naznacheniya na sodержanie radona na territoriyah, obsluzhivaemyh FMBA Rossii // *Radiacionnaya gigiena*. 2015. T. 8. № 1. S. 23–29. (In Russian)]
10. *Цапалов А.А., Маренный А.М.* Принципы радонового контроля в помещениях зданий // *АНРИ*. 2014. № 1. С. 6–15. [*Tsapalov A.A., Marennyy A.M.* Principy radonovogo kontrolya v pomeshcheniyah zdaniy // *ANRI*. 2014. № 1. S. 6–15. (In Russian)]
11. *Онищенко А.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В.* Влияние временных вариаций уровней радона и погрешностей измерений на оценку средних сезонных значений объемной активности радона в помещении // *АНРИ*. 2013. № 3. С. 2–12. [*Onishchenko A.D., Zhukovskij M.V., Vasil'ev A.V.* Vliyaniye vremennykh variatsiy urovnej radona i pogreshnostej izmerenij na ocenku srednih sezonnykh znachenij ob'emnoj aktivnosti radona v pomeshchenii // *ANRI*. 2013. № 3. S. 2–12. (In Russian)]
12. *Miles J.C.H.* Temporal variation of radon levels in houses and implications for measurement strategies // *Radiat. Prot. Dosim.* 2001. № 93. P. 369–375.
13. *Vasilyev A.V., Yarmoshenko I.V. and Zhukovsky M.V.* Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient building // *Radiat. Prot. Dosim.* 2015. V. 164. № 4. P. 1–5.
14. *Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации.* Доклад НКДАР ООН за 1988 г. М.: Мир, 1992. Т. 1. 552 с. [*Istochniki, efekty i opasnost' ioniziruyushchej radiacii.* Doklad NKDAR OON za 1988 g. M.: Mir, 1992. T. 1. 552 s. (In Russian)]
15. *Жилищное хозяйство в России.* 2016: Стат. сб. М.: Росстат, 2016. 63 с. [*Zhilishchnoe hozyajstvo v Rossii.* 2016: Stat. sb. M.: Rosstat, 2016. 63 s. (In Russian)]
16. *Zhukovsky M., Yarmoshenko I., Kiselev S.* Combination of geological data and radon survey results for radon mapping // *J. Environ. Radioact.* 2012. V. 112. P. 1–3.
17. *Белецкая Ю.В., Крупный Г.И., Мамаев А.М., Расцветалов Я.Н.* Вариации плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона // *АНРИ*. 2010. № 1 (60). С. 34–36. [*Beleckaya Yu.V., Krupnyj G.I., Mamaev A.M., Rascvetalov Ya.N.* Variacii plotnosti potoka radona s poverhnosti pochvy eksperimental'nogo poligona // *ANRI*. 2010. № 1 (60). S. 34–36. (In Russian)]
18. *Гулябянц Л.А., Заболоцкий Б.Ю.* Сезонная вариация потока радона из грунта и оценка радоноопасности площади застройки // *АНРИ*. 2004. № 4. С. 46–50. [*Gulabyanc L.A., Zabolockij B.Yu.* Sezonnaya variatsiya potoka radona iz grunta i ocenka radonoopasnosti ploshchadi zastrojki // *ANRI*. 2004. № 4. S. 46–50. (In Russian)]
19. *Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б.* Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Изд-во “Перо”, 2016. 394 с. [*Marennyy A.M., Tsapalov A.A., Miklyaev P.S., Petrova T.B.* Zakonomernosti formirovaniya radonovogo polya v geologicheskoy srede. M.: Izdatel'stvo “Pero”, 2016. 394 s. (In Russian)]
20. *Szabó K., Jordan G., Horváth A., Szabó C.* Dynamics of soil gas radon concentration in a high permeable soil based on a long-term high-resolution measurement series // *J. Environ. Radioact.* 2013. V. 124. P. 74–83.
21. *Mullerova M., Holy K., Bulko M.* Daily and seasonal variations in radon activity concentration in the soil air // *Radiat. Prot. Dosim.* 2014. V. 160. № 1–3. P. 222–225.
22. СП 2.6.1.2612-10 “Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)”. [SP 2.6.1.2612-10 “Osnovnyye sanitarnyye pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB 99/2010)” (In Russian)]
23. *Nazaroff W.W., Feustal H., Nero A.V. et al.* Radon transport into a detached one-storey house with a basement // *Atoms. Environ.* 1985. № 19. P. 31–46.
24. *Цапалов А.А., Кувшинников С.И.* Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха // *АНРИ*. 2008. № 2. С. 37–43. [*Tsapalov A.A., Kuvshinnikov S.I.* Zavisimost' ob'emnoj aktivnosti radona v pomeshcheniyah ot raznosti vnutrennej i naruzhnoy temperatury vozduha // *ANRI*. 2008. № 2. S. 37–43. (In Russian)]
25. *Tsapalov A., Kovler K., Miklyaev P.* Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface // *J. Environ. Radioact.* 2016. V. 160. P. 28–35.
26. *Eaton R.S., Scott A.G.* Understanding radon transport into houses // *Radiat. Prot. Dosim.* 1984. № 7. P. 251–253.
27. *Pinel J., Fearn T., Darby S.C., Miles J.C.H.* Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom // *Radiat. Prot. Dosim.* 1995. V. 58. 127–132.

28. *Васильев А.В.* Радонобезопасность современных многоэтажных зданий: Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: Институт промышленной экологии УрО РАН, 2014. [*Vasil'ev A.V.* Radonobezopasnost' sovremennyh mnogoetazhnyh zdaniy: Dis. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg: Institut promyshlennoj ekologii UrO RAN, 2014. (In Russian)]
29. *Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В.* Радон: от фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: Изд-во "ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России", 2016. 432 с. [*Kiselev S.M., Zhukovskij M.V., Stamat I.P., Yarmoshenko I.V.* Radon: ot fundamental'nyh issledovanij k praktike regulirovaniya. Moskva: Izd-vo "FGBU GnC FMBC im. A.I. Burnazyana FMBA Rossii", 2016. 432 s. (In Russian)]
30. *Цапалов А.А.* Закономерности поведения радоновой активности в помещениях зданий и принцип контроля // Вестн. МГСУ. 2011. № 3. С. 15–23. [*Capalov A.A.* Zakonomernosti povedeniya radonovoj aktivnosti v pomeshcheniyah zdaniy i princip kontrolya // Vestnik MGSU. 2011. № 3. S. 15–23. (In Russian)]

Variations of Radon Activity Concentration in Traditional Village Houses

P. S. Miklyaev^{a,#} and T. B. Petrova^b

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Chemistry, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: peterm7@inbox.ru*

In order to assess the time variability of radon concentration in the premises of traditional village houses, continuous measurements of radon activity concentration in the premises air of two houses located in the Western part of the Moscow region (Mozhaisk and Istra districts) were carried out in August 2017, in July–August 2018 and in February–March 2019. In the summer of 2017, continuous measurements of radon flux density from the ground surface near the house were performed simultaneously. It was found that the nature of variations in radon concentration in the room depends on the season. In summer, the radon concentration in village houses is subject to strong daily fluctuations, which are characterized by highs at night and lows during the day. Radon concentration is directly proportional to the temperature difference inside and outside the room and inversely proportional to the wind speed. In winter, the indoor radon concentration was on average three times higher than in summer, and varied inversely with the temperature difference inside and outside the house there were no daily fluctuations. Regardless of the season, factors such as the radon flux density from the ground surface, as well as the mode of operation of the premises (ventilation) practically do not affect the concentration of radon in village houses.

Keywords: radon variations, indoor radon concentration, radon flux density from soil surface, stack effect