

КАРОТКІЯ ПАВЕДАМЛЕННІ • КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ • RESEARCH BRIEFS

УДК 551.79:550.42(476)

<https://doi.org/10.65207/1680-2373-2025-2-126-131>

О ПОСТУПЛЕНИИ РАДОНА К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЖИДКИМИ АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ

М. И. Автушко¹, **А. В. Матвеев²**, С. А. Исаченко¹, П. Н. Короткевич¹¹Государственное научное учреждение «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси»
ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Беларусь

E-mail: awtushka.m@gmail.com

²Государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси»
ул. Франциска Скорины, 10, 220076, Минск, Беларусь

Выполнены измерения концентрации радона в воде весенне-летне-осенних дождей (2022–2024 гг.). Установлена зависимость уровней поступления радона на земную поверхность с жидкими атмосферными осадками (ЖАО) от направления ветров, несущих дождевые облака. Представленные результаты исследования иллюстрируют роль ЖАО в переносе радона из атмосферы к земной поверхности и дают количественную характеристику одного из реальных путей его стока, который не учитывается в современных моделях массопереноса атмосферных загрязнителей.

Ключевые слова: радон, дочерние продукты распада радона (ДПР), жидкие атмосферные осадки, сток радона из атмосферы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время радон широко используется при обосновании моделей переноса аэрозольных, газообразных и иных атмосферных загрязнителей как трассер, концентрация которого в воздухе считается не подверженной существенным изменениям под влиянием обычных атмосферных факторов. Радоновый метод оценки переноса загрязняющих веществ в атмосфере состоит в сравнении одновременно измеряемых концентраций компонентов: газа-трассера (^{222}Rn) с предположительно известными источниками и стоками и вещества-поллютанта (газа или аэрозоля), параметры переноса (потока) которого требуется определить. Кроме того, использование радона в качестве маркера эмиссии газов из почвы позволяет оценивать следовые выбросы парниковых газов, происходящие с больших территорий.

Поскольку радон химически инертен, то он не вступает в реакции с атмосферными газами, с любыми аэрозольными или иными химическими компонентами и не уходит из атмосферы с продуктами таких реакций, как это происходит с другими газовыми компонентами атмосферы. Растворимость радона в воде относительно низка (коэффициент растворимости $K_p \approx 0,5$ при температуре 0°C , $K_p \approx 0,25$ при 20°C). На этом основании принято считать, что радон не очень

чувствителен к процессам влажного удаления из атмосферы и что единственный сток его из атмосферы – радиоактивный распад [7; 8; 9]. Возможность иных путей количественно значимого стока радона из атмосферы в настоящее время не изучается и не обсуждается, хотя данные о том, что радиоактивные инертные газы (ксенон, аргон) могут активно вымываться из атмосферы и доставляться к земной поверхности с дождем, получены еще в 60-е годы прошлого века [2; 4; 5].

В настоящем сообщении показаны результаты исследования параметров реального выноса (стока) радона и его дочернего продукта ^{214}Pb из атмосферы с жидкими атмосферными осадками при различных направлениях ветровых потоков, несущих дождевые облака.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Обычно при построении моделей переноса согласованно предполагается, что поступление ^{222}Rn в атмосферу распределено более или менее равномерно по континенту со скоростью эмиссии 1 атом с 1 см^2 в секунду и равно нулю на морской поверхности [6; 9]. Вместе с тем существует разнообразие подходов к применению данных по радону, что обычно объясняется различиями в пространственном и временном разрешении между глобальными и региональными моделями. Однако эти различия

могут быть также связаны с дефицитом подходящих данных и, как следствие, с нереалистичными граничными условиями модели. Необходимость знания точных значений эмиссий парниковых и химически активных газов требует адекватного отношения к оценкам эмиссии ^{222}Rn [3; 9]. Отсутствие достоверных данных о процессах и факторах миграции радона из атмосферы является одной из причин нерелевантной интерпретации закономерностей и условий формирования его концентраций, зависящих от уровня эмиссии с земной поверхности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования атмосферного массопереноса радона выполнялись на экспериментальной радонометрической площадке Института радиобиологии НАН Беларуси (г. Гомель). Дождевую воду собирали в плоскую пластиковую емкость и после накопления количества, достаточного для гамма-спектрометрического анализа (≥ 100 мл), сливали в калиброванный сосуд, герметизировали крышку пластилином и передавали в лабораторию. Определение концентрации радона в дождевой воде производилось по результатам измерения удельной активности (УА) его гамма-излучающего ДПР – ^{214}Pb по линии с энергией $E = 351,9$ кэВ, квантовый выход $\eta = 37\%$, с использованием гамма-спектрометра Tennelec с полупроводниковым hpGe -детектором. Время экспозиции водосборной емкости зависело от интенсивности дождя и колебалось в пределах 5–35 мин. В течение отрезка времени, соответствующего отбору пробы дождевой воды, фиксировалось направление ветра и измерялась температура воды спиртовым термометром, находящимся в водосборной емкости.

Система расчета концентрации радона по данным об измеренной концентрации его ДПР основана на представлении, что количество ^{214}Pb в дождевой воде состоит из двух пулов – атмосферного ($\text{Pb}_{\text{ат}}$), образованного при распаде радона еще в атмосфере и захваченного в аэрозольной форме дождевыми каплями на пути к земной поверхности, и радонового ($\text{Pb}_{\text{Рн}}$), который образуется из радона, вынесенного дождем из атмосферы, непосредственно в пробе дождевой воды. Химически инертные атомы радона и атомы его дочернего продукта ^{214}Pb , находящиеся в атмосфере преимущественно в аэрозольной форме, сорбируются дождевыми

каплями с разной интенсивностью, и уже по этой причине можно ожидать существенное нарушение равновесия между радоном и его ДПР в выпадающей на земную поверхность дождевой воде. Следовательно, прямое определение радона по результатам гамма-спектрометрического определения УА его ДПР в дождевой воде не может дать достоверных результатов. С учетом сказанного, определение УА $\text{Pb}_{\text{ат}}$ в пробах дождевой воды выполняли через три часа после отбора проб. Период полураспада радионуклида составляет 27,06 мин, то есть за 3 часа ($\approx 6,65$ периода полураспада ^{214}Pb) атмосферный $\text{Pb}_{\text{ат}}$, собранный дождевой водой в ионной форме, распадется до незначимой величины ($\sim 1,5\%$ от исходного количества), не превышающей инструментальную ошибку его определения. Результат измерения показывает только количество $\text{Pb}_{\text{Рн}}$, который за это время придет в равновесие с радоном, содержащимся в пробе дождевой воды, и измеренная УА радионуклида будет соответствовать активности радона.

Однако в ходе исследований было установлено, что при разбрызгивании дождевых капель, падающих на твердые поверхности (на грунт, на стебли, листья растений и т. д.) или даже на водную поверхность в водосборной емкости, существенная часть содержащегося в них радона выделяется в приземный воздух, тогда как $\text{Pb}_{\text{ат}}$, находящийся в дождевой воде в ионной форме, остается в растворе. Поэтому в пробах дождевой воды соотношение между радоном и $\text{Pb}_{\text{Рн}}$ будет существенно искаженным по сравнению изначальным соотношением количества этих компонентов в дожде, а измеряемое нами количество ДПР отражает только остаточное количество радона ($\text{Rn}_{\text{ост}}$).

Для учета потерь радона за счет барботирования каплями дождя и для более полной оценки его содержания в выпадающих ЖАО применялась методика сбора дождевой воды, основанная на использовании мягкой пластиковой водосборной емкости – объемного (160 л, высотой 1,2 м) пластикового мешка. При падении капель дождя на вертикальные стенки мешка эффект барботирования ограничен, а выделяющийся из капель радон, благодаря тяжести его молекул (в 7,5 раза превышающих массу молекул воздуха), преимущественно остается в мешке. После завершения отбора пробы в мешок помещается включенный радиометр аэрозолей PPA-10, мешок плотно завязывается. Количество радона, выделившееся в воздух единицей объема дождевой воды, определяется по соотношению:

$$Rn_{\text{возд}} = (Rn_{\text{ф}} - Rn_{\text{в}}) / V_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $Rn_{\text{ф}}$ – количество радона, сорбированного фильтром радиометра (Бк); $Rn_{\text{в}}$ – количество радона в исходном воздухе в объеме измерительного мешка (Бк); $V_{\text{д}}$ – объем пробы дождевой воды (л). Измеренные таким образом значения концентрации радона, поступающего в воздух измерительного мешка из дождевой воды вследствие барботирования ($Rn_{\text{б}}$), суммируются со значениями, полученными при определениях остаточного радона в дождевой воде, и дают приближенную общую оценку количества атмосферного радона, приносимого дождем к земной поверхности:

$$Rn_{\text{ат}} = Rn_{\text{б}} + Rn_{\text{ост}}, \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные авторами результаты определения концентрации радона в воде дождей 2022–2024 гг. ($Rn_{\text{ат}}$ Бк/л) показаны в таблице. Приведенные данные свидетельствуют, что среднееголетнее значение остаточной концентрации радона в дождевой воде ($R_{\text{ост}}$), измеренной через 3 ч после завершения

отбора проб, составляло 14 ± 24 Бк/л. Средняя величина количества радона ($Rn_{\text{б}}$), выделяющегося из падающей дождевой воды, оцененная по результатам измерений методом «мешка», составила 90 ± 165 Бк/л. Сумма этих величин, характеризующая исходную концентрацию радона в выпадающих ЖАО, составляет 105 ± 189 Бк/л, что соответствует среднееголетнему количеству ^{222}Rn , поступающему к земной поверхности с каждым миллиметром ЖАО. В результате в регионе г. Гомеля, находящегося в среднеширотной субконтинентальной климатической зоне, при среднегодовом количестве ЖАО 600 мм вынос (сток) радона из атмосферы спорадически выпадающими дождями может быть количественно оценен в 113 кБк/м^2 в год, что сопоставимо с плотностью потока радона из грунтов экспериментальной радонометрической площадки – $5,8 \pm 2 \text{ мБк/(м}^2\text{с)}$, то есть $\sim 180 \text{ кБк/м}^2$ в год.

Максимальная концентрация радона фиксируется в дождевой воде, принесенной субконтинентальными южными и юго-восточными ветрами, минимальной концентрацией обоих радионуклидов отличаются северо-западные и западные дожди, принесенные субатлантическими ветрами (рис. 1).

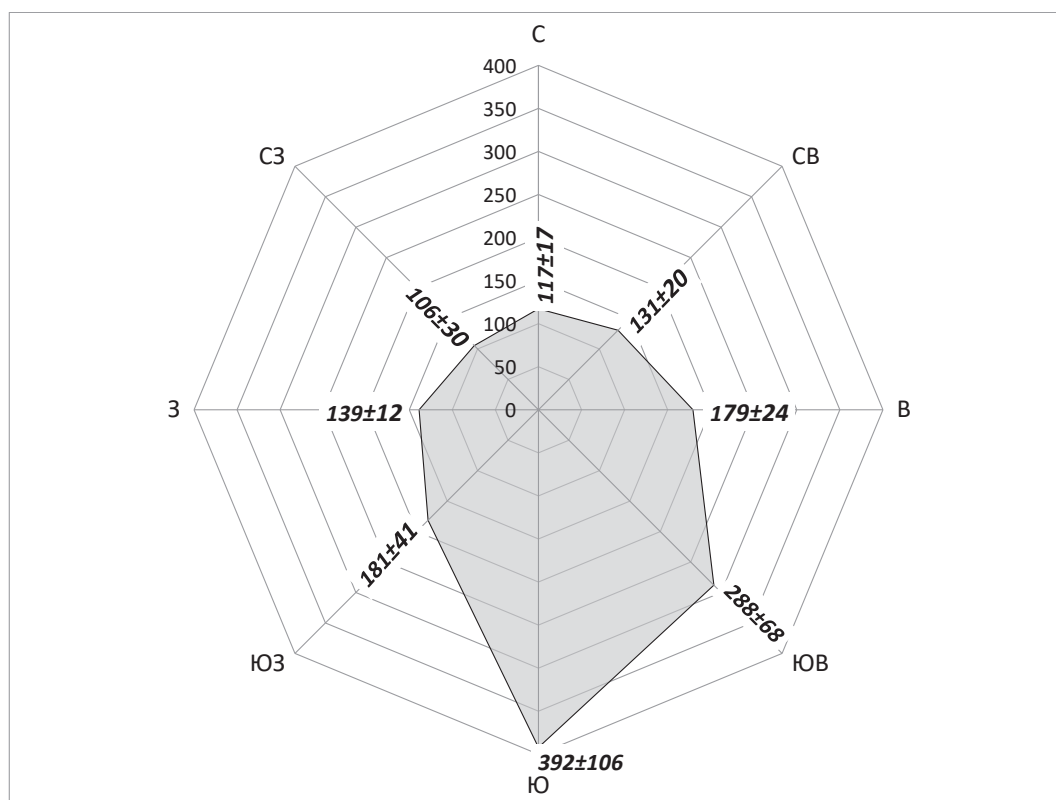


Рисунок 1 – Среднееголетняя (2022–2024 гг.) концентрация радона в дождях (Бк/л)

Таблица – Концентрация ²²²Rn и ²¹⁴Pb в дождевой воде (Бк/л)

Направление ветра	2022 г.				2023 г.				2024 г.			
	Rn _г	R _{ост}	Rn _{ат}	²¹⁴ Pb	Rn _г	R _{ост}	Rn _{ат}	Pb _{Rn}	Rn _г	R _{ост}	Rn _{ат}	Pb _{Rn}
С	91	13±1	104	113±50	98	14±6	112	189±116	119	17±1	136	139
СВ	133	19±4	152	118±36	112	16±1	128	147±68	98	14±7	112	152
В	168	24±7	192	187±21	168	24±4	194	306±48	133	19±9	152	167±117
ЮВ	308	44±26	352	306±23	189	27±8	216	461±147	259	37±11	296	293±116
Ю	378	54±11	432	376±101	238	34±18	272	327±135	413	59±22	472	442±220
ЮЗ	189	27±16	216	209±78	119	17±11	136	290±6	168	24±7	192	241±42
З	112	16±11	128	112±45	133	19±4	152	122±39	119	17±4	136	81±38
СЗ	56	7±4	64	63±27	111	14±9	123	71±9	77	11±3	88	70±35
Ср. значение	179±111	26±16	205±127	186±108	146±47	21±7	167±56	239±129	173±112	25±16	198±127	198±124
Количество измерений	60				33				36			

КАРОТКІЯ ПАВЕДАМЛЕННІ • КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ • RESEARCH BRIEFS

Существенная часть радона, принесенного с ЖАО в приповерхностный грунт, в последующие бездождевые периоды склонна к диффузионному (или с испаряющейся влагой) поступлению обратно в атмосферный воздух, отражая таким образом своеобразный круговорот радона в приземной атмосфере.

Из представленных данных следует, что реальная эмиссия радона с земной поверхности в атмосферу может существенно превышать значения, обычно оцениваемые по локальным и региональным измерениям потока радона из грунта. Принос радона к земной поверхности спорадически выпадающими ЖАО может служить основной причиной появления аномальных значений эмиссии (плотности потока) радона, не подтверждаемых последующими повторными измерениями, как это показано исследованиями [8; 9]. Вследствие этого реальные параметры эмиссии радона из грунта в атмосферу значимо отличаются от предполагаемых фоновых, а исходные соотношения концентраций радона и газового или аэрозольного компонента, перенос которого исследуется, непредсказуемо нарушаются, искажая результаты модельных построений. В этой связи оценка влияния ЖАО на уровни концентрации радона в приземном атмосферном воздухе и в приповерхностных грунтах и на вариабельность его эмиссии с земной поверхности в атмосферу представляется необходимой для обоснования достоверности моделей

атмосферного массопереноса веществ, основанных на использовании радона как базового трассера. Использование показанного подхода к интерпретации стока радона с ЖАО необходимо также для обеспечения достоверности оценок радоноопасности селитебных территорий, одним из критериев которой является уровень плотности потока радона из грунта в атмосферный воздух.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты предпринятого в настоящей работе изучения содержания радона в дождевой воде иллюстрируют реальную роль ЖАО в миграционном переносе радионуклида из атмосферы к земной поверхности и дают количественную характеристику одного из реально существующих путей его стока, который не учитывается в современных моделях переноса загрязняющих веществ или парниковых газов. Показано, что уровни стока радона с ЖАО связаны с направленностью ветровой турбулентности атмосферы, что свидетельствует о необходимости учета также и этого фактора при построении моделей. Кроме того, существенные различия в содержании радона в дождевой воде, приносимой ветрами различной направленности, указывают на вероятную нерелевантность оценок скоростей эмиссии радона, принимаемых при построении моделей переноса, а также используемых при оценке радоноопасности территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аномалии** плотности потока радона на территории Москвы / П. С. Микляев [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2017. – № 5. – С. 39–47.
2. **К вопросу** о возможной корреляции концентраций долгоживущих продуктов распада радона в приземном воздухе с атмосферной циркуляцией / Б. И. Лукшене [и др.] // Физика атмосферы : сб. науч. тр. / Литовская академия наук, Институт физики. – Вильнюс, 1977. – Вып. 3. – С. 15–26.
3. **Наблюдения** состава атмосферы над Россией: эксперименты TROICA / Н. Ф. Еланский [и др.] // Извест. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 79–98. DOI: 10.31857/S0002351521010041.
4. **Оценка** вымывания радиоактивных инертных газов облаками и дождем / Д. Ю. Блувштейн [и др.] // Физика атмосферы : сб. науч. тр. / Литовская академия наук, Институт физики. – Вильнюс, 1986. – Вып. 11. – С. 115–119.
5. **Стыро, Б. И.** Распределение радиоактивности на каплях дождя / Б. И. Стыро, С. А. Гарбалаускас // Исследование процессов самоочищения атмосферы от радиоактивных изотопов : сб. докл., прочит. на совещ. в Паланге 7–9 июня 1966 г. / под ред. Б. И. Стыро. – Вильнюс : Минтис, 1968. – С. 2340.
6. **Conen, F.** Latitudinal distribution of radon-222 flux from continents / F. Conen, L. B. Robertson // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. – 2002. – Vol. 54 (2). – P. 127–133. DOI: 10.3402/tellusb.v54i2.16653.
7. **Josse, B.** Radon global simulations with the multiscale chemistry and transport model MOCAGE / B. Josse, P. Simon, V.-H. Peuch // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. – 2004. – Vol. 56 (4). – P. 339–356. DOI: 10.3402/tellusb.v56i4.16448.
8. **Radon** Emissions to the Atmosphere and their use as an Atmospheric Tracer [electronic resource] / L. B. Robertson. – Edinburgh : University of Edinburgh, 2004. – 237 p. – URL: <https://www.researchgate.net/>

publication/319541881_Radon_emissions_to_the_atmosphere_and_their_use_as_an_atmospheric_tracer (date of access: 05.06.2024).

9. **Zahorowski, W.** Ground based radon-222 observations and their application to atmospheric studies / W. Zahorowski, S. D. Chambers, A. Henderson-Sellers // Journal of Environmental Radioactivity. – 2004. – Vol. 76 (1–2). – P. 3–33. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.03.033.

Артыкул паступіў у рэдакцыю 25.07.2025

Рэцэнзент У. М. Шымановіч

АБ ПАСТУПЛЕННІ РАДОНУ ДА ЗЯМНОЙ ПАВЕРХНІ З ВАДКІМІ АТМАСФЕРНЫМІ АПАДКАМІ

М. І. Аўтушка¹, А. В. Мацвееў², С. І. Ісачанка¹, П. Н. Караткевіч¹

¹Дзяржаўная навуковая ўстанова «Інстытут радыябіялогіі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі»
вул. Федзюнінскага, 4, 246007, Гомель, Беларусь
E-mail: awtushka.m@gmail.com

²Дзяржаўная навуковая ўстанова «Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі»
вул. Францыска Скарыны, 10, 220076, Мінск, Беларусь

Асаблівасці паступлення радону да зямной паверхні з дажджавой вадой вывучаліся на эксперыментальнай радонаметрычнай пляцоўцы Інстытута радыябіялогіі НАН Беларусі (г. Гомель). Работы выконваліся ў вясенне-летне-асенні перыяд 2022–2024 гг. Канцэнтрацыя радону ў вадзе ацэньвалася па ўдзельнай актыўнасці яго даччынага прадукту распаду ²¹⁴Pb з выкарыстаннем спектраметрычнага комплексу МКС АТ6101ДР і гама-спектрометра Теннелес з паўправадніковым hνGe-дэтэктарам на лініі з энергіяй $E = 351,9$ кэВ. Усяго выканана 60 аналізаў у 2022 г., 33 і 36 аналізаў у 2023 і 2024 гг. адпаведна. Устаноўлена, што канцэнтрацыя радону ў пробах вады змянялася ў інтэрвале 7–59 Бк/л, а сярэдняя велічыня выносімага да зямной паверхні радону з вадкімі ападкамі складала 14 ± 24 кБк/м² за год. Таксама высветлена, што максімальныя велічыні радону прыносіліся аблокамі з поўдня і паўднёвага ўсходу (сярэднія велічыні 106 ± 392 і 288 ± 68 Бк/л адпаведна), а мінімальныя – з захаду, паўночнага захаду і з поўначы (139 ± 12 , 92 ± 30 і 117 ± 17 Бк/л). Атрыманыя даныя важна ўлічваць пры характарыстыцы радонанебяспекі ўрбанізаваных тэрыторый і пры абгрунтаванні мадэлей масапераносу атмасферных палютантаў.

Ключавыя словы: радон, даччыныя прадукты распаду радону (ДПР), вадкія атмасферныя ападкі, сцёк радону з атмасферы.

ON THE ENTRY OF RADON TO THE EARTH'S SURFACE WITH LIQUID PRECIPITATION

М. І. Autushka¹, A. V. Matveyev², S. A. Isachenko¹, P. N. Korotkevich¹

¹Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus
4 Fedyunsky St, 246007, Gomel, Belarus
E-mail: awtushka.m@gmail.com

²Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus
10 F. Skoriny St, 220076, Minsk, Belarus

Significant differences in radon content in rainwater carried by winds of different directions have been identified, indicating the likely inaccuracy of estimates of radon emission rates from the Earth's surface used in models of atmospheric transport of pollutants or greenhouse gases that use radon as a baseline tracer. A dependence of radon input to the Earth's surface via liquid atmospheric precipitation (LIP) on the wind direction carrying rain clouds is demonstrated, demonstrating the need to consider this factor when constructing models. The presented research results illustrate the role of LIP in radon transport from the atmosphere to the Earth's surface and provide a quantitative characterization of one of the real pathways for its runoff, which is not considered in current models of atmospheric pollutant transport.

Keywords: radon, daughter products of radon (DPR), liquid atmospheric precipitation, radon runoff from the atmosphere.