

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.41:551.510.71

Взаимосвязь концентрации атмосферных ионов и радона по данным измерений в обсерватории «Фоновая»

**М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹, О.В. Гармаш², Д.К. Давыдов¹, А.А. Демакова²,
Е.В. Ежова², А.В. Козлов¹, М. Kulmala², Н. Lappalainen², Т. Petäjä^{2*}**

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия*

²*Institute for Atmospheric and Earth System Research, University of Helsinki
Gustaf Hällströmin katu 2, FI-00014, Helsinki, Finland*

Поступила в редакцию 29.11.2021 г.

Приведены результаты исследования взаимосвязи поступления в воздух радона и образования ионов по данным наблюдений, проводимых в обсерватории «Фоновая» ИОА СО РАН. Показано, что такая связь является устойчивой в период с октября по январь. В остальные месяцы она нарушается. Если же из массы данных убрать события нуклеации и грозových разрядов, то такая связь проявляется в течение всего года.

Ключевые слова: атмосфера, воздух, ионы, наночастицы, нейтральные частицы, нуклеация, радон, взаимосвязь; *atmosphere, air, ions, nanoparticles, neutral particles, nucleation, radon, interconnection.*

Введение

Согласно предварительной версии шестого доклада МГЭИК [1], атмосферный аэрозоль по-прежнему вносит наибольшую неопределенность в радиационный блок при оценке вклада отдельных примесей воздуха в глобальное потепление климата. Еще в XX в. было установлено [2], что аэрозольный процесс в атмосфере начинается с образования (нуклеации) наноразмерных частиц из молекул малых газовых примесей. Затем в результате действия механизмов конденсационного роста и коагуляции такие частицы достигают размеров радиационно значимой аккумуляционной фракции [3–5].

Важным эффектом, сопутствующим образованию новых частиц, является присутствие заряженных частиц – ионов – в атмосфере [6]. Так, например, появление нейтральных частиц размером 2 нм происходит на 20–30 мин позже регистрации ионов размером 2 нм [7]. Исследование [8] показало, что образование ионов в ночное время наблюдается, но не сопровождается образованием нейтральных частиц. Авторы [9] уточняют, что концентрация

ионов размером 2–4 нм как предшественников образования новых частиц должна быть не ниже 20 см^{-3} . Однако имеющиеся сведения о роли ионов в образовании аэрозольных частиц противоречивы. Так, в [10] получено, что заряженные частицы увеличивают нуклеацию на 1–2 порядка величины. В [11, 12], наоборот, существенных изменений получено не удалось. Авторы [13] на основании численного и лабораторного моделирования показали, что заряженные частицы могут обеспечить нуклеацию даже при минимальных концентрациях паров серной кислоты. Следовательно, исследование роли ионов в аэрозольных процессах должно быть продолжено.

Основными источниками образования ионов являются космическое гамма-излучение и гамма-излучение, возникающее в результате радиоактивного распада таких соединений, как радон [14–16]. Ионизация космическим излучением происходит во всей тропосфере и преобладает над морями и океанами, в то время как эманация радона определяет режим ионов (концентрацию и ее временную динамику – суточный, сезонный, годовой ход) в приземном слое воздуха над сушей [17]. В [18] дополнительно найдено, что ионы могут образовываться за счет трения при сильном ветре, хотя этот механизм не может быть отнесен к основному. С учетом того, что поступление радона в атмосферу существенно зависит от местоположения района исследований [19–21], от метеорологических и геофизических параметров [22, 23], включая осадки [24], весьма интересно изучить, как эти процессы проявляются в конкретном географическом районе, в котором подобные исследования не проводились.

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Ольга Владиславовна Гармаш (olga.garmash@tuni.fi); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Анастасия Александровна Демакова (anastasiia.demakova@helsinki.fi); Екатерина Валерьевна Ежова (ekaterina.ezhova@helsinki.fi); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Markku Kulmala (markku.kulmala@helsinki.fi); Hanna Lappalainen (hanna.k.lappalainen@helsinki.fi); Tuukka Petäjä (tuukka.petaja@helsinki.fi).

В настоящей работе рассматривается временная динамика концентрации ионов в зависимости от содержания радона в фоновом районе Томской области.

1. Район измерений и оборудование

Концентрация ионов и радона измерялась в обсерватории «Фоновая». Станция находится в Западной Сибири (координаты $56^{\circ}25'$ с.ш., $84^{\circ}04'$ в.д.), на правом берегу р. Оби, и окружена бореальным лесом. Ближайший промышленный центр, г. Томск, расположен в 60 км к востоку.

Для измерения ионов использовался спектрометр нейтральных кластеров и ионов NAIS, позволяющий регистрировать распределение по размерам кластеров (аэрозольных частиц) и аэроионов в диапазоне 0,8 ... 40 нм при концентрациях от 10 до 100000 см^{-3} с погрешностью 10%. Для измерения объемной активности радона ($\text{Rn } 222$) и торона ($\text{Rn } 220$) применялся радиометр SARAD RTM 2200, работающий в диапазоне 0 ... 10^7 Бк/ м^3 , с погрешностью ± 1 Бк/ м^3 . Воздух для прибора отбирался с высоты 2 м над поверхностью земли. Наблюдения за аэроионами начались в июле, а за радонам — в декабре 2019 г. Измерения проводились ежедневно. С помощью комплекса обсерватории [25] синхронно регистрировались метеорологические величины, газовый и аэрозольный составы.

2. Результаты и их обсуждение

Поскольку аэроионы и радон ранее в обсерватории «Фоновая» не измерялись, вначале рассмотрим их временную динамику. На рис. 1 представлены среднегодовой суточный ход суммарной (по всем размерам) концентрации ионов (N^- — отрицательные, N^+ — положительные) и радона, а также годовой ход, построенный по среднемесячным значениям.

Из рис. 1, а видно, что в течение суток содержание положительных ионов несколько больше, чем отрицательных. Ход кривых концентраций ионов практически синхронный. Суточные ходы ионов и радона оказались прямо противоположными по фазе. Максимум концентрации радона наблюдается в ночное время, а минимум — во второй половине дня. С учетом того, что источник радона — подстилающая поверхность, такой ход вполне естественен. Ночью формируется задерживающий слой и газ накапливается в приземном воздухе. Днем он исчезает и радон начинает рассеиваться во всем пограничном слое атмосферы [26]. Ионы, которые образуются в самом воздухе, ведут себя иначе. Максимум их концентраций наблюдается в послеполуденное время, а минимум — в утренние часы. Такой суточный ход характерен для фотохимических процессов в атмосфере, например, таких как образование озона и других реакционноспособных частиц [27].

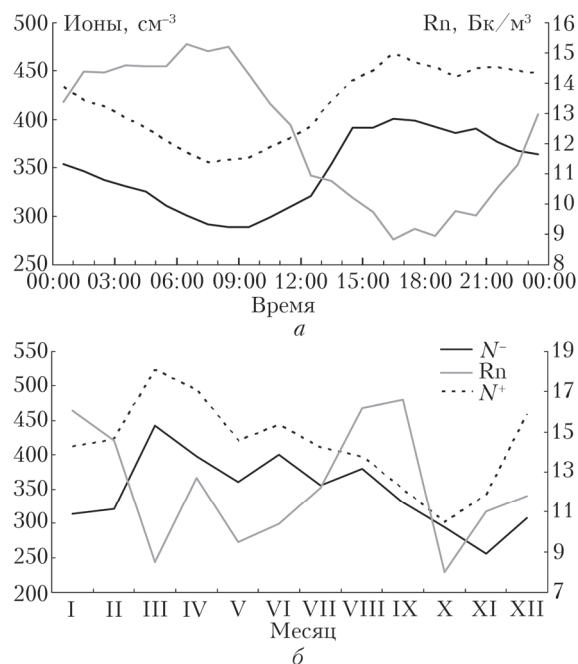


Рис. 1. Суточный (а) и годовой (б) ход концентрации аэроионов и радона

Концентрация радона, наблюдаемая в обсерватории «Фоновая», соизмерима с данными, полученными другими авторами в подобных условиях [19, 20, 28]. Также хорошо совпадают и результаты по его суточному ходу [29–32]. Количество регистрируемых ионов, как положительных, так и отрицательных, лежит в пределах диапазонов, найденных другими авторами [17, 33, 34]. Подобными оказались и суточные вариации, приведенные на рис. 1, а и в [35–37]. Следовательно, полученные нами данные находятся в пределах естественной изменчивости исследуемых величин.

Сезонные вариации концентрации ионов и радона заметно различаются, как это следует из рис. 1, б. Максимум содержания ионов обоих знаков приходится на раннюю весну, а минимум — на среднюю или позднюю осень. Это, на наш взгляд, также отражает роль фотохимических процессов в образовании ионов. В ходе таких процессов, например при генерации озона, наряду с нейтральными аэрозольными частицами в промежуточных циклах возникают радикалы. Их количество и вид будут зависеть от газов-предшественников. Естественно, что прибор в ходе измерений зафиксирует эти радикалы как ионы.

Если не учитывать межмесячные колебания, то у радона наблюдается совершенно другой годовой ход. Можно выделить два почти одинаковых годовых максимума на рис. 1, б: зимой (январь) и поздним летом — в начале осени, а также два минимума: весной и в середине осени.

Попытка сопоставления годового хода радона и аэроионов с данными для других регионов оказалась неудачной. В каждом из районов наблюдается свой, отличный от других [31, 32, 38–41], годовой ход этих величин. Поскольку наши данные

приведены для 2020 г., возможно, это следствие локдауна, связанного с пандемией коронавируса. Имеется достаточно много работ, отражающих изменение состава воздуха из-за уменьшения выбросов [42–45]. Однако процессы, связанные с локдауном, могли повлиять только на годовой ход концентрации ионов, в то время как особенности годового хода радона, по-видимому, объясняются иными механизмами, ведь он имеет почвенное происхождение.

Перейдем к анализу взаимосвязи концентраций ионов и радона. Вначале рассмотрим, как она изменяется в течение года по данным ежечасных измерений (табл. 1).

Несмотря на то, что суточный ход ионов находится в противофазе с радоном, изменчивость концентраций в различные дни достаточно велика, чтобы скомпенсировать эту особенность. Таким образом, коэффициенты корреляции между концентрациями ионов и радона в основном положительные.

Из данных табл. 1 следует, что есть связь между концентрациями ионов и радона с разным уровнем значимости с октября по январь. Несмотря на близость положительных и отрицательных ионов как в течение суток, так и в среднем за год (см. рис. 1), степень связи с радоном заметно зависит от знака ионов. Хотя в отдельные месяцы коэффициенты корреляции между разнополярными ионами и радоном близки. Возможно, это зависит от механизма образования ионов того или другого знака.

Поскольку ежечасные значения концентрации радона очень сильно меняются в течение суток, была проверена теснота связи среднесуточных значений, чтобы сгладить имеющуюся изменчивость (табл. 2).

Сопоставление данных табл. 1 и 2 показывает, что процедура сглаживания не выявила усиления связи между ионами и радоном, но эта связь становится значимой начиная с сентября. Это несколько странно, так как сравнение среднесуточных значений, приведенное на рис. 2, показывает, что их ход достаточно синхронен.

Из проведенного выше анализа следует, что в течение года имеются периоды с устойчивой, иногда значимой по высшему уровню, связью между поступлением радона и образованием ионов. Бывают периоды, когда такой связи нет.

Чтобы разобраться в возможных причинах такого расхождения в поведении ионов и эмиссии радона, нужно вспомнить, что в приземном слое воздуха ионы возникают при грозах и, как уже отмечалось, при образовании наночастиц. В ряде работ [47–50] показано, что в случае образования новых частиц параллельно могут появляться ионы обоих знаков. Процессы образования новых наночастиц усиливаются за счет ультрафиолетового излучения, что отражает фотохимический механизм их появления [51, 52]. Поясним это на примере рис. 3, где показано образование новых частиц для конкретного дня (21 сентября 2020 г.), а также приведены данные о концентрации нуклеационной моды ($N_{3-25 \text{ нм}}$) и суммарной концентрации наночастиц ($N_{3-200 \text{ нм}}$).

Видно, что с 11:00 до 17:00 по местному времени образовались новые нейтральные аэрозольные частицы, о чем можно судить по суммарной концентрации частиц и аэрозолей нуклеационной моды. Этот процесс сопровождался ростом концентрации как положительных, так и отрицательных ионов. При этом роста или большого расходования радона не наблюдалось. Следовательно, при частых

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между ежечасными концентрациями радона и отрицательных (N^-) и положительных (N^+) ионов в обсерватории «Фоновая» в 2020 г.

Концентрация	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
N^-	0,25***	-0,03	0,13*	-0,10*	0,01	-0,07	0,08*	0,08*	0,05	0,28***	0,43***	0,16***
N^+	0,60***	0,09*	0,14*	-0,03	0,03	-0,03	0,07	-0,01	0,12**	0,29***	0,51***	0,19***
Число случаев	727	528	367	714	743	670	744	744	720	560	720	401

* Уровень значимости с вероятностью 0,05, ** с вероятностью 0,01, *** с вероятностью 0,001 [46].

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между среднесуточными концентрациями радона и отрицательных и положительных ионов в обсерватории «Фоновая» в 2020 г. (см. обозначения в табл. 1)

Концентрация	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
N^-	0,58**	-0,07	0,35	-0,08	0,14	0,03	0,35*	-0,14	0,66***	0,59**	0,54**	0,43
N^+	0,71***	0,06	0,36	0,09	0,24	0,08	0,44*	-0,03	0,46**	0,59**	0,70***	0,48*
Число случаев	24	22	29	30	31	28	31	31	30	23	30	19

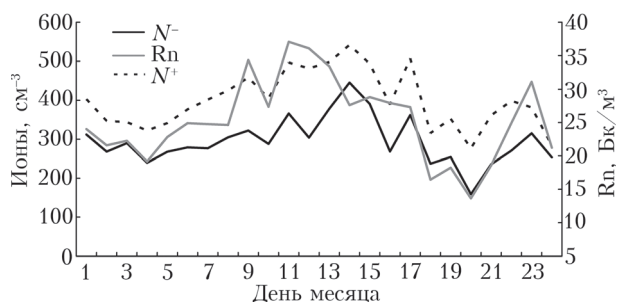


Рис. 2. Среднесуточные значения концентрации радона, положительных и отрицательных ионов в январе 2020 г.

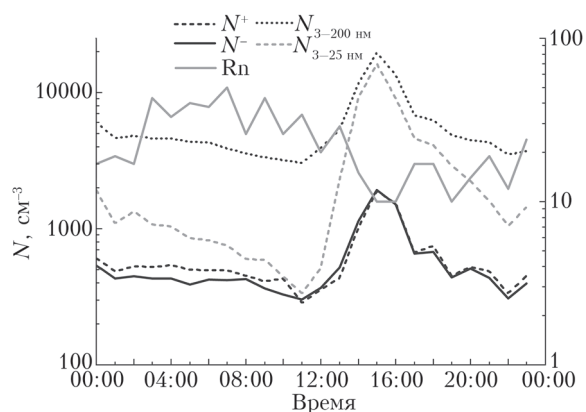


Рис. 3. Временная динамика концентрации радона, положительных и отрицательных ионов, частиц нуклеационного диапазона ($N_{3-25 \text{ нм}}$) и суммарной концентрации наночастиц ($N_{3-200 \text{ нм}}$) в обсерватории «Фоновая» 21 сентября 2020 г.

событиях образования новых частиц такие процессы будут нарушать связь между вариациями концентраций ионов и радона. И чем чаще они будут происходить, тем больше должны быть расхождения.

Образование ионов при грозах можно рассмотреть на примере рис. 4.

В отличие от происходящего при образовании новых частиц, при грозах генерируется значительно больше ионов, чем нейтральных частиц. Из рис. 4 видно, что при прохождении над обсерваторией грозы в ~ 18:00 по местному времени концентрация ионов возросла почти на порядок, а содержание нейтральных частиц увеличилось всего в несколько раз. Концентрация радона при этом оставалась в пределах естественной суточной изменчивости.

И наконец, на рис. 5 представлены изменения концентраций радона, ионов и нейтральных частиц, когда нуклеации или гроз не наблюдалось.

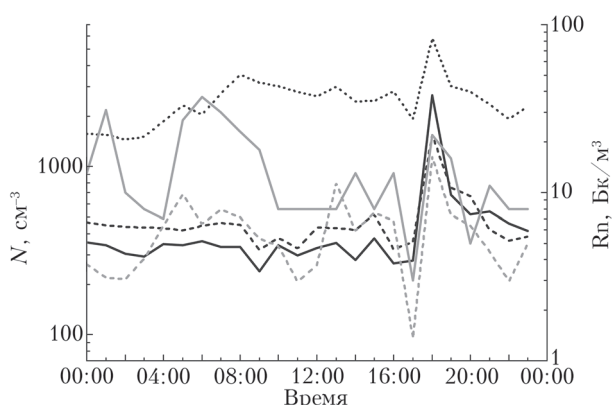


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, 26 июня 2020 г.

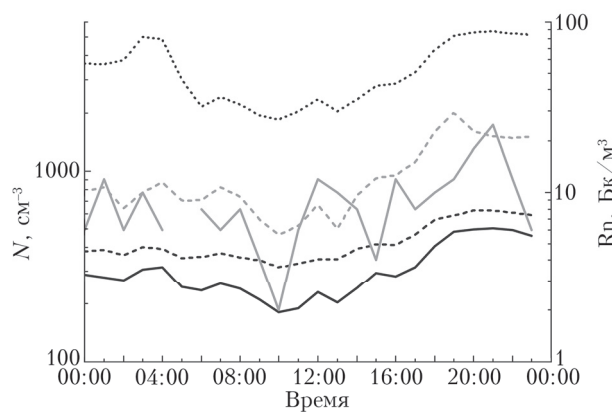


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, 16 января 2021 г.

Видно, что в «спокойных» условиях изменчивость всех характеристик остается в пределах одного порядка, а ход радона с учетом межчасовых флуктуаций соответствует временной динамике ионов. Значения $N_{3-25 \text{ нм}}$ и $N_{3-200 \text{ нм}}$ следуют за изменением концентрации ионов.

Мы исключили из общего массива данных, который использовался при составлении табл. 1, дни с грозами и событиями нуклеации 1-го и 2-го типов [53] (в англоязычной литературе “banana” and “half-banana” types [54, 55]) и повторно пересчитали коэффициенты корреляции между концентрациями ионов и радонов (табл. 3).

Из данных табл. 3 следует, что взаимосвязь между ионами и радоном наблюдается для положительных ионов почти в течение всего года, исключение составляет лишь август. Для отрицательных ионов связь не установлена в феврале, апреле и июне. По сравнению с табл. 1 результаты табл. 3 показывают, что либо связь появилась, либо у нее

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между ежечасными концентрациями радона и отрицательных и положительных ионов в обсерватории «Фоновая» в 2020 г. без событий нуклеации и гроз

Концентрация	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
N^-	0,36***	-0,03	0,16**	-0,01	0,08*	0,05	0,09*	0,13**	0,14**	0,28***	0,43***	0,16***
N^+	0,50***	0,11*	0,20**	0,14**	0,16**	0,10*	0,11**	0,05	0,27**	0,29***	0,51***	0,19***
Число случаев	543	510	278	638	687	623	728	674	681	560	720	401

повысился уровень значимости. Таким образом, если убрать из выборки события, которые могут приводить к образованию ионов в атмосфере, помимо зарядки частиц продуктами распада радона, то взаимосвязь между ними существует в течение всего года. Отсутствие взаимосвязи в отдельные месяцы, скорее всего, обусловлено тем, что из выборки не были убраны события нуклеации других типов помимо 1-го.

Чтобы проиллюстрировать связь между концентрациями радона и положительных и отрицательных ионов, по часовым данным были построены соответствующие диаграммы рассеяния (рис. 6, цв. вкладка). На рис. 6, *а*, *б* показаны все имеющиеся данные за 2020 г., а на рис. 6, *в*, *г* — данные, для которых концентрация нейтральных частиц не превышает 2000 см^{-3} . Выбранный порог соответствует характерному содержанию нейтральных частиц в атмосфере в бореальном лесу.

Из рис. 6, *а*, *б* видно, что высокие концентрации ионов совпадают с высоким содержанием нейтральных частиц, соответствующим нуклеационным всплескам. Большинство этих точек, отмеченных темно-красным цветом, располагается в верхней части диаграмм при достаточно низких концентрациях радона ($< 20 \text{ Бк/м}^{-3}$), следовательно, радон не оказывает существенного влияния на образование ионов при нуклеационных всплесках. В обычные дни для низких концентраций нейтральных частиц видно увеличение нижней границы концентрации ионов с ростом концентрации радона. Для наглядности диаграммы рассеяния, соответствующие низким концентрациям нейтральных частиц, отдельно показаны на рис. 6, *в*, *г*. Видно, что с ростом концентрации радона концентрации ионов увеличиваются от $60\text{--}80 \text{ см}^{-3}$ до $350\text{--}400 \text{ см}^{-3}$. Таким образом, в обычные дни содержание радона в атмосфере определяет нижнюю границу концентрации ионов.

Заключение

Проведенное исследование показывает, что образование ионов путем зарядки частиц продуктами распада радона наблюдается в течение всего года. Этот процесс может маскироваться при появлении более мощных процессов генерации ионов в атмосфере, например тех, которые сопутствуют всплескам появления новых нейтральных частиц, или грозových разрядов. При удалении таких событий из выборки проявляется взаимосвязь концентраций радона и ионов. Таким образом, статистически значимые, хотя часто слабые, корреляции концентраций радона и ионов указывают на то, что радон играет определенную роль в формировании ионов в течение всего года, за исключением явлений нуклеации и гроз.

Работа выполнена по проекту Минобрнауки РФ «Развитие измерительного комплекса обсерватории «Фоновая» для проведения исследований по между-

народной программе РЕЕХ (Пан-Евразийский эксперимент) (соглашение № 075-15-2021-977).

1. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
2. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. АН СССР, 1955. 352 с.
3. *Розенберг Г.В., Любовцева Ю.С., Горчаков Г.И.* Фоновый аэрозоль Абастумани // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1982. Т. 18, № 8. С. 822–839.
4. *Розенберг Г.В.* Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля — кинетически обусловленные параметры // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1983. Т. 19, № 1. С. 21–35.
5. *Розенберг Г.В.* Кинетическая модель обезвоженного тонкодисперсного аэрозоля тропосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1983. Т. 19, № 3. С. 241–254.
6. *Hirsikko A., Nieminen T., Gagne S., Lehtipalo K., Manninen H.E., Ehn M., Horrak U., Kerminen V.-M., Laakso L., McMurry P.H., Mirme A., Mirme S., Petaja T., Tammet H., Vakkari V., Vana M., Kulmala M.* Atmospheric ions and nucleation: A review of observations // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 2. P. 767–798.
7. *Gonser S.G., Klein F., Birmili W., Größ J., Kulmala M., Manninen H.E., Wiedensohler A., Held A.* Ion–particle interactions during particle formation and growth at a coniferous forest site in central Europe // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 19. P. 10547–10563.
8. *Mazon S.B., Kontkanen J., Manninen H.E., Nieminen T., Kerminen V.-M., Kulmala M.* A long-term comparison of nighttime cluster events and daytime ion formation in a boreal forest // Boreal Environ. Res. 2016. V. 21, N 3–4. P. 242–261.
9. *Leino K., Nieminen T., Manninen H.E., Petäjä T., Kerminen V.-M., Kulmala M.* Intermediate ions as a strong indicator of new particle formation bursts in boreal forest // Boreal Environ. Res. 2016. V. 21, N 3–4. P. 274–286.
10. *Yu F., Turco R.P.* The size-dependent charge fraction of sub-3-nm particles as a key diagnostic of competitive nucleation mechanisms under atmospheric conditions // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 18. P. 9451–9463.
11. *Merikanto J., Duplissy J., Määttä A., Henschel H., Donahue N.M., Brus D., Schobesberger S., Kulmala M., Vehkamäki H.* Effect of ions on sulfuric acid-water binary particle formation: 1. Theory for kinetic- and nucleation-type particle formation and atmospheric implications // J. Geophys. Res.: Atmos. 2016. V. 121, N 4. P. 1736–1751. DOI: 10.1002/2015JD023538.
12. *Dunne E.M., Lee L.A., Reddington C.L., Carslaw K.S.* No statistically significant effect of a short-term decrease in the nucleation rate on atmospheric aerosols // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 23. P. 11573–11587.
13. *Kirkby J., Duplissy J., Sengupta K., Frege C., Gordon H., Williamson C., Heinritzi M., Simon M., Yan C., Almeida J., Tröstl J., Nieminen T., Ortega I.K., Wagner R., Adamov A., Amorim A., Bernhammer A.-K., Bianchi F., Breitenlechner M., Brilke S., Chen X., Craven J., Dias A., Ehrhart S., Flagan R.C., Franchin A., Fuchs C., Guida R., Hakala J., Hoyle C.R., Jokinen T., Junninen H., Kangasluoma J., Kim J., Krapf M., Kürten A., Laaksonen A., Lehtipalo K., Makhmutov V., Mathot S., Molteni U., Onnela A.,*

- Peräkylä O., Piel F., Petäjä T., Praplan A.P., Pringle K., Rap A., Richards N.A.D., Riiipinen I., Rissanen M.P., Rondo L., Sarnela N., Schobesberger S., Scott C.E., Seinfeld J.H., Sipilä M., Steiner G., Stozhkov Y., Stratmann F., Tomé A., Virtanen A., Vogel A.L., Wagner A.C., Wagner P.E., Weingartner E., Wimmer D., Winkler P.M., Ye P., Zhang X., Hansel A., Dommen J., Donahue N.M., Worsnop D.R., Baltensperger U., Kulmala M., Carslaw K.S., Curtius J. Ion-induced nucleation of pure biogenic particles // *Nature*. 2016. V. 533, N 7604. P. 521–526.
14. Serrano C., Reis A.H., Rosa R., Lucio P.A. Influences of cosmic radiation, artificial radioactivity and aerosol concentration upon the fair-weather atmospheric electric field in Lisbon (1955–1991) // *Atmos. Res.* 2006. V. 81, N 2. P. 236–249.
 15. Manohar S.N., Meijer H.A.J., Herber M.A. Radon flux maps for the Netherlands and Europe using terrestrial gamma radiation derived from soil radionuclides // *Atmos. Environ.* 2013. V. 81. P. 399–412.
 16. Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Макрушин А.П., Шихова Н.М. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 155–170.
 17. Komppula M., Vana M., Kerminen V.-M., LiHAVAINEN H., Viisanen Y., Hörrak U., Komsaare K., Tamm E., Hirsikko A., Laakso L., Kulmala M. Size distributions of atmospheric ions in the Baltic Sea region // *Boreal Environ. Res.* 2007. V. 12, N 3. P. 323–336.
 18. Chen X., Virkkula A., Kerminen V.-M., Manninen H.E., Busetto M., Lanconelli C., Lupi A., Vitale V., del Guasta M., Grigioni P., Väänänen R., Duplissy E.-M., Petäjä T., Kulmala M. Features in air ions measured by an air ion spectrometer (AIS) at Dome C // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 22. P. 13783–13800.
 19. Zhang K., Feichter J., Kazil J., Wan H., Zhuo W., Griffiths A.D., Sartorius H., Zahorowski W., Ramonet M., Schmidt M., Yver C., Neubert R.E.M., Brunke E.-G. Radon activity in the lower troposphere and its impact on ionization rate: a global estimate using different radon emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 15. P. 7817–7838.
 20. Lypez-Coto I., Mas J.L., Bolivar J.P. A 40-year retrospective European radon flux inventory including climatological variability // *Atmos. Environ.* 2013. V. 73. P. 22–33.
 21. Berezina E.V., Elansky N.F., Moiseenko K.B., Belikov I.B., Shumsky R.A., Safronov A.N., Brenninkmeijer C.A.M. Estimation of nocturnal ²²²Rn soil fluxes over Russia from TROICA measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 23, N 15. P. 11695–11708.
 22. Sahoo S.K., Katlamudi M., Shaji J.P., Krishna K.S.M., Lakshmi G.U. Influence of meteorological parameters on the soil radon (Rn222) emanation in Kutch, Gujarat, India // *Environ. Monit. Assess.* 2018. V. 190, N 111.
 23. Podstawczynska A. Differences of near-ground atmospheric Rn-222 concentration between urban and rural area with reference to microclimate diversity // *Atmos. Environ.* 2016. V. 126. P. 225–234.
 24. Bottardi C., Alberi M., Baldoncini M., Chiarelli E., Montuschi M., Raptis K.G.C., Serafini A., Strati V., Mantovani F. Rain rate and radon daughters' activity // *Atmos. Environ.* 2020. V. 238. P. 117728.
 25. Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Y.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M. Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: Current status and future needs // *Phys. Proc. SPIE*. 2018. V. 10833. P. 108337Z.
 26. Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // *Оптика атмосф. и океана*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1045–1054.
 27. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
 28. Porstendorfer J. Свойства и поведение радона и торона и их дочерних продуктов в воздухе // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2001. Вып. 9. С. 59–98.
 29. Chambers S.D., Williams A.G., Crawford J., Griffiths A.D. On the use of radon for quantifying the effects of atmospheric stability on urban emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 3. P. 1175–1190.
 30. Chen X., Paatero J., Kerminen V.-M., Riuttanen L., Hatakka J., Hiltunen V., Paasonen P., Hirsikko A., Franchin A., Manninen H.E., Petäjä T., Viisanen Y., Kulmala M. Responses of the atmospheric concentration of radon-222 to the vertical mixing and spatial transportation // *Boreal Environ. Res.* 2016. V. 21, N 3–4. P. 299–318.
 31. Victor N.J., Siingh D., Singh R.P., Singh R., Kamra A.K. Diurnal and seasonal variations of radon (²²²Rn) and their dependence on soil moisture and vertical stability of the lower atmosphere at Pune, India // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 195. P. 105118.
 32. Chambers S., Williams A.G., Zahorowski W., Griffiths A., Crawford J. Separating remote fetch and local mixing influences on vertical radon measurements in the lower atmosphere // *Tellus B*. 2011. V. 63, N 5. P. 843–859.
 33. Wang Y., Wang Ya., Duan J., Cheng T., Zhu H., Xie X., Liu Y., Ling Y., Li X., Wang H., Li M., Zhang R. Temporal variation of atmospheric static electric field and air ions and their relationships to pollution in Shanghai // *Aerosol Air Qual. Res.* 2018. V. 18, N 7. P. 1631–1641.
 34. Li Y., Guo X., Wang T., Zhao Y., Zhang H., Wang W. Characteristics of atmospheric small ions and their application to assessment of air quality in a typical semi-arid city of Northwest China // *Aerosol Air Qual. Res.* 2015. V. 15, N 3. P. 865–874.
 35. Kamsali N., Pawar S.D., Murugavel P., Gopalakrishnan V. Estimation of small ion concentration near the Earth's surface // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2011. V. 73, N 16. P. 2345–2351.
 36. Ling X., Jayaratne R., Morawska L. The relationship between airborne small ions and particles in urban environments // *Atmos. Environ.* 2013. V. 79. P. 1–6.
 37. Dos Santos V.N., Herrmann E., Manninen H.E., Hussein T., Hakala J., Nieminen T., Aalto P.P., Merkel M., Wiedensohler A., Kulmala M., Petäjä T., Hämeri K. Variability of air ion concentrations in urban Paris // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 23. P. 13717–13737.
 38. Chambers S.D., Hong S.-B., Williams A.G., Crawford J., Griffiths A.D., Park S.-J. Characterising terrestrial influences on Antarctic air masses using Radon-222 measurements at King George Island // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 18. P. 9903–9916.
 39. Botha R., Labuschagne C., Williams A.G., Bosmane G., Brunke E.-G., Rossouw A., Lindsay R. Characterising fifteen years of continuous atmospheric radon activity observations at Cape Point (South Africa) // *Atmos. Environ.* 2018. V. 176. P. 30–39.
 40. Kalivitis N., Stavroulas I., Bougiatioti A., Kouvarakis G., Gagne S., Manninen H.E., Kulmala M., Mihalopoulos N. Night-time enhanced atmospheric ion

- concentrations in the marine boundary layer // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 8. P. 3627–3638.
41. Miao S., Zhang X., Han Y., Sun W., Liu C. Yin S. Random forest algorithm for the relationship between negative air ions and environmental factors in an urban park // *Atmosphere*. 2018. V. 9, N 12. P. 463.
 42. Salma I., Vörösmarty M., Gyöngyösi A.Z., Thén W., Weidinger T. What can we learn about urban air quality with regard to the first outbreak of the COVID-19 pandemic? A case study from central Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 24. P. 15725–15742.
 43. Johnson T.F., Hordley L.A., Greenwell M.P., Evans L.C. Associations between COVID-19 transmission rates, park use, and landscape structure // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 789. P. 148123.
 44. Mertens M., Jöckel P., Matthes S., Nützel M., Grewe V., Sausen R. COVID-19 induced lower-tropospheric ozone changes // *Environ. Res. Lett.* 2021. V. 16, N 6. P. 064005.
 45. Bouarar I., Gaubert B., Brasseur G.P., Steinbrecht W., Doumbia T., Tilmes S., Liu Y., Stavrou T., Deroubaix A., Darras S., Granier C., Lacey F., Muller J.-F., Shi X., Elguindi N., Wang T. Ozone anomalies in the free troposphere during the COVID-19 pandemic // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 46, N 16. P. 094204.
 46. Болшев Л.Н. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
 47. Tamm H., Komsaare K., Hörrak U. Intermediate ions in the atmosphere // *Atmos. Res.* 2014. V. 135–136. P. 263–273.
 48. Jayaratne E.R., Ling X., Morawska L. Suppression of cluster ions during rapidly increasing particle number concentration events in the environment // *Aerosol Air Qual. Res.* 2015. V. 15, N 1. P. 28–37.
 49. Salma I., Thén W., Aalto P., Kerminen V.-M., Kern A., Barcza Z., Petäjä T., Kulmala M. Influence of vegetation on occurrence and time distributions of regional new aerosol particle formation and growth // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, N 4. P. 2861–2880.
 50. Li H., Canagaratna M.R., Riva M., Rantala P., Zhang Y., Thomas S., Heikkinen L., Flaud P.-M., Villenave E., Perraudin E., Worsnop D., Kulmala M., Ehn M., Bianchi F. Atmospheric organic vapors in two European pine forests measured by a Vocus PTR-TOF: insights into monoterpene and sesquiterpene oxidation processes // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21, N 5. P. 4123–4147.
 51. Rose C., Sellegri K., Freney E., Dupuy R., Colomb A., Pichon J.-M., Ribeiro M., Bourianne T., Burnet F., Schwarzenboeck A. Airborne measurements of new particle formation in the free troposphere above the Mediterranean Sea during the HYMEX campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 17. P. 10203–10218.
 52. Wehner B., Werner F., Ditas F., Shaw R.A., Kulmala M., Siebert H. Observations of new particle formation in enhanced UV irradiance zones near cumulus clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 17. P. 10203–10218.
 53. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Илев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Симоненков Д.В., Антохин П.Н. Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть I. Классификация и повторяемость // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 9. С. 766–774.
 54. Kulmala M., Laakso L., Lehtinen K.E.J., Riipinen I., Dal Maso M., Anttila T., Kerminen V.-M., Hörrak U., Vana M., Tamm H. Initial steps of aerosol growth // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4. P. 2553–2560.
 55. Heintzenberg J., Wehner B., Birmili W. How to find bananas in the atmospheric aerosol: New approach for analyzing atmospheric nucleation and growth events // *Tellus B*. 2007. V. 59, N 2. P. 273–282.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, O.V. Garmash, D.K. Davydov, A.A. Demakova, E.V. Ezhova, A.V. Kozlov, M. Kulmala, H. Lappalainen, T. Petäjä. **Correlation between the concentrations of atmospheric ions and radon as judged from measurements at the Fonovaya Observatory.**

The correlation between the radon influx into the atmosphere and the formation of ions has been studied based on observations at the Fonovaya Observatory of Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. This correlation is shown to be stable in the period from October to January. In the other months, the correlation is disturbed. However, if the events of nucleation and lightning discharges are removed from the data set, then the correlation is kept throughout the year.

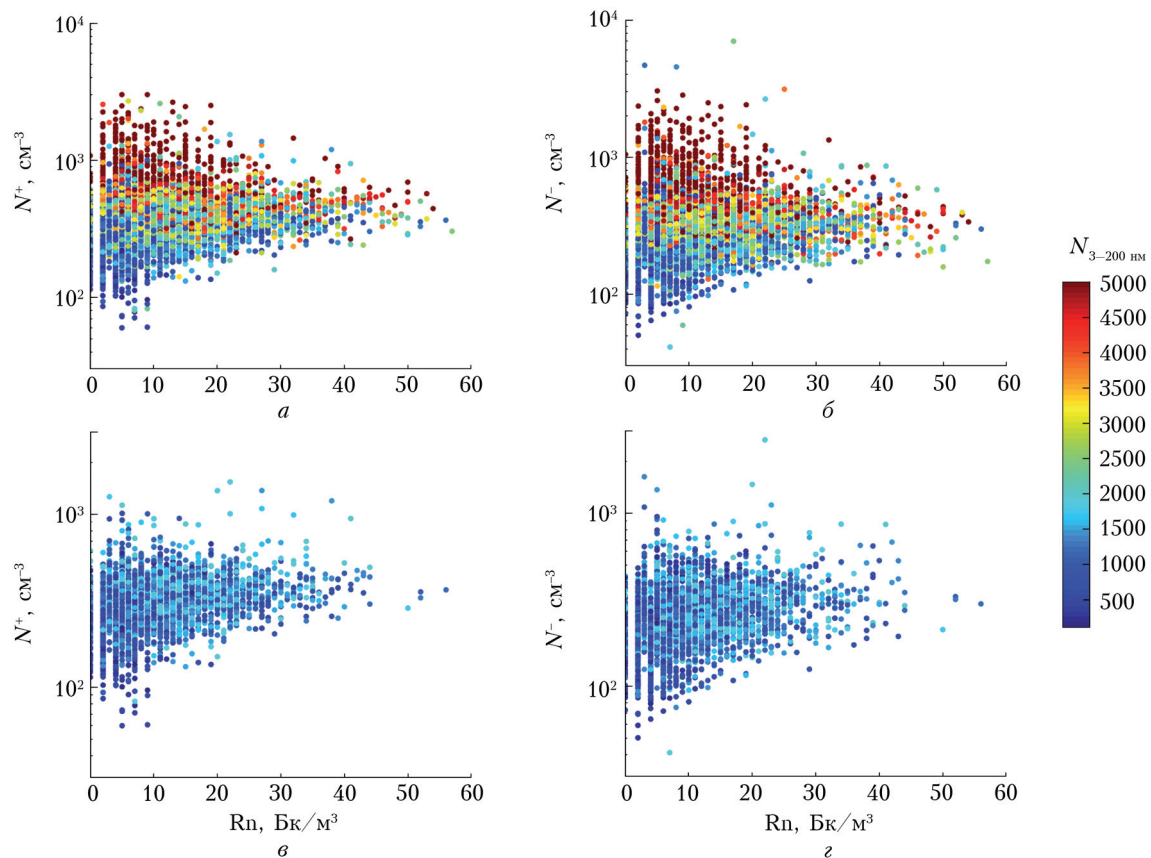


Рис. 6. Диаграммы рассеяния: радон – положительно заряженные ионы, все данные (*a*); радон – отрицательно заряженные ионы, все данные (*б*); радон – положительно заряженные ионы, $N_{3-200 \text{ нм}} < 2000 \text{ см}^{-3}$ (*в*); радон – отрицательно заряженные ионы, $N_{3-200 \text{ нм}} < 2000 \text{ см}^{-3}$ (*г*)