

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.41

Динамика концентрации атмосферных ионов по данным измерений в обсерватории «Фоновая»

М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан[✉], С.Б. Белан, Д.К. Давыдов*

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

Поступила в редакцию 29.05.2025;

после доработки 23.06.2025;

принята к печати 25.06.2025

Атмосферные ионы играют важную роль в процессах образования аэрозольных частиц и влияют на здоровье населения. Однако данных об их концентрации на территории России крайне мало. Для восполнения этого пробела в обсерватории «Фоновая» с июля 2019 г. был начат мониторинг содержания ионов. Проведенный анализ показал, что с июля 2019 г. по май 2024 г. концентрации отрицательных и положительных аэроионов находились в пределах 220–720 см⁻³. У отрицательных ионов имеется тренд +7%/год, а у положительных –1,2%/год. У ионов обоих знаков наблюдается достаточно четкий годовой ход с максимумом в летнее время и минимумом в зимнее. Средний многолетний суточный ход свидетельствует, что концентрации ионов обоих знаков изменяются синхронно: минимум наблюдается в утренние часы, максимум – в послеполуденное время. Полученные данные позволяют уточнить роль ионов в атмосферных процессах.

Ключевые слова: атмосфера, воздух, ионы, концентрация, годовой ход, суточный ход, коэффициент униполярности, наночастицы, нейтральные частицы, нуклеация; *atmosphere, air, ion, concentration, annual variation, daily cycle, unipolarity coefficient, nanoparticle, neutral particle, nucleation.*

Введение

Исследование ионов имеет большое теоретическое и прикладное значение из-за роли, которую они играют в атмосфере. Наличие заряженных частиц в воздухе заметно усиливает образование новых наноразмерных частиц [1]. В работе [2] показано, что заряженные частицы увеличивают нуклеацию на один-два порядка величины. Таким образом в атмосфере запускается весь аэрозольный процесс, в ходе которого в результате конденсационного роста и коагуляции частицы достигают размеров радиационно значимой субмикронной фракции [3, 4]. Концентрация ионов определяет электропроводность атмосферы и значительно влияет на заряд облаков и, следовательно, на грозовую деятельность [5]. Их количество в воздухе сильно уменьшается при наличии загрязняющих примесей [6], что сказывается на его качестве. Поэтому природоохранными органами установлены нормативы содержания ионов в атмосфере. Они указаны в САНПИНе 1.2.3685-21 в виде минимальных концентраций ионов, которые безопасны для здоровья человека [7].

Первым продемонстрировал образование ионов в воздухе еще в 1900 г. К.Т.Р. Вильсон [5, 8, 9].

С этого времени наши знания об их поведении в атмосфере существенно расширились. Основными источниками образования заряженных частиц в споконных условиях являются космические лучи и гамма-излучение, возникающее в результате радиоактивного распада, например, радона [10, 11]. Различают два вида ионизации в газах [12]. Если энергия возбуждения передается другой частицей (электроном, атомом или ионом) при столкновении, то такая ионизация называется ударной. Если ионизируемые частицы получают энергию от фотонов, то процесс образования ионов называется фотоионизацией. Ионизация космическими лучами происходит во всей тропосфере, но в большей степени над морями и океанами, в то время как эманации радона определяют режим ионов в приземном слое воздуха над сушей [13]. В ходе таких механизмов ионизации образуются молекулярные ионы и легкие аэроионы [5]. Если легкий ион соединяется с частицей аэрозоля, то образуется средний или тяжелый ион [12]. При этом мощность основных источников не одинакова. Возникшим после распада радона и торона излучением ионизируется воздух с интенсивностью 10–40 пар ионов в секунду (в среднем). Космические лучи формируют две-четыре пары ионов в секунду.

В ряде работ сообщается о том, что ионы могут образоваться за счет трения при сильном ветре [14, 15]. Однако такие механизмы представляются локальными и не должны вносить значительного вклада в глобальную электрическую цепь в атмосфере планеты.

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru).

Ввиду важной роли ионов в атмосферных процессах их исследование интенсивно ведется за рубежом. Этого нельзя сказать о современной России. Ранее, в бывшем СССР, мониторинг ионов осуществлялся в НПО «Тайфун» под руководством В.В. Смирнова [12]. В настоящее время в основном выполняются теоретические работы [16–20]. В литературе удалось обнаружить только три публикации, посвященные измерениям концентрации ионов в атмосфере [21, 22] и в помещении [23]. Для огромной территории России такого количества наблюдений явно недостаточно. Поэтому в рамках Пан-Евразийского комплексного эксперимента в июле 2019 г. были начаты измерения аэроионов в обсерватории «Фоновая», которые продолжаются до сих пор.

Цель настоящей работы — исследование временной динамики концентрации ионов в 2019–2024 гг.

Материалы и методы

Обсерватория «Фоновая» находится на территории Западной Сибири (56°25' с.ш., 84°04' в.д.). Она расположена на правом берегу р. Оби и окружена бореальным лесом. Ближайший промышленный центр (г. Томск) находится к востоку на расстоянии 60 км.

Для измерения ионов использовался спектрометр нейтральных кластеров и ионов NAIS. Он позволяет регистрировать их распределение по размерам в диапазоне 0,8...40 нм при концентрациях от 10 до 100000 см⁻³ в каждом канале с неопределенностью 10%. Отбор воздуха для прибора осуществлялся на высоте 2 м от поверхности земли; измерения проводились круглосуточно.

В работе [24] было оценено типичное время жизни, или время пребывания иона в атмосфере (оно составило 4 мин). С учетом средней мобильности ион может пройти путь около 5 м. Следовательно, ионы находятся только в той области, где происходит ионизация частиц. Учитывая локальный характер процессов ионизации и турбулентный режим атмосферы, измерения концентрации ионов желательнее проводить с высокой скоростью, выше 1 Гц. Однако в этом случае будет утеряна статистическая обеспеченность данными измерений. Напомним, что в среднем концентрация ионов лежит в пределах 400–600 см⁻³ [10, 11]. Даже при частоте 1 Гц будет фиксироваться 7–10 ионов в секунду. Если разложить это на 25 каналов (размеров), то в большинстве из них будут зарегистрированы нули. Поэтому в использованном приборе частота съема одного спектра составляла 2 мин 40 с, или 160 с. Как выглядит динамика разовых отсчетов суммарной в диапазоне 0,8–40 нм счетной концентрации ионов за один час, показано на рис. 1. Видно, что наблюдаются заметные флуктуации концентрации, близкие по продолжительности к оценке времени жизни ионов в атмосфере, полученной в [24].

Анализируя флуктуации многих атмосферных параметров с целью нахождения оптимального пе-

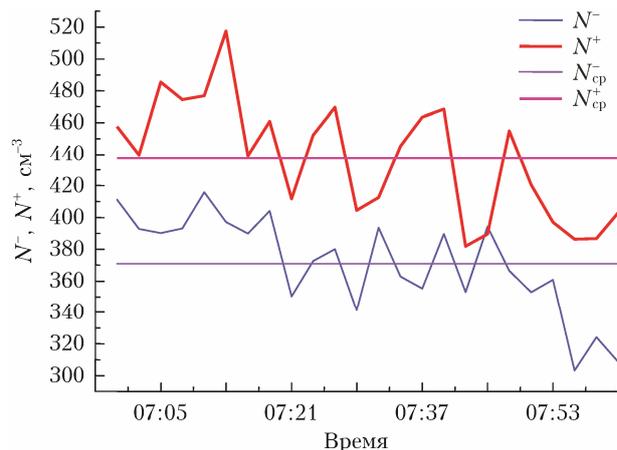


Рис. 1. Суммарная счетная концентрация отрицательных и положительных ионов. Измерения 27.01.2020 г. (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.12>)

риода осреднения для исключения турбулентных вариаций, А.С. Монин определил, что для температуры воздуха такой период может составлять 2 мин, а для ветра — 10 мин [25].

Воспользовавшись таким подходом, мы опробовали несколько вариантов осреднений и пришли к выводу, что наиболее оптимальным для атмосферных ионов является период в один час. Это видно из рис. 1, на котором приведены разовые измерения ионов и их средние значения за один час. Все данные в дальнейшем будут приведены с таким периодом осреднения.

Параллельно с измерением ионов регистрировались метеорологические параметры, газовый и аэрозольный состав атмосферы с помощью комплекса обсерватории «Фоновая». Его полное описание представлено в работе [26].

Результаты и обсуждение

Многолетний ход

Концентрации положительных и отрицательных ионов в 2019–2024 гг. приведены на рис. 2. На графиках исключены данные в период гроз, так как при сильных электрических полях результаты измерений могут искажаться.

Из рис. 2 видно, что за период наблюдений концентрации обоих видов аэроионов находились в пределах 220–720 см⁻³. Их содержание в атмосфере возрастало летом и уменьшалось зимой. Изменные концентрации хорошо согласуются с данными из [13, 27] для зоны бореальных лесов. Также видны тренды концентрации: положительный у отрицательных ионов (+7%/год) и отрицательный у положительных (-1,2%/год).

На рис. 2 можно выявить и еще одну закономерность. С 2019 г. по середину 2022 г. концентрация положительных ионов N⁺ была в среднем выше, чем отрицательных N⁻. Со второй половины 2022 г. соотношение изменилось. Отрицательных

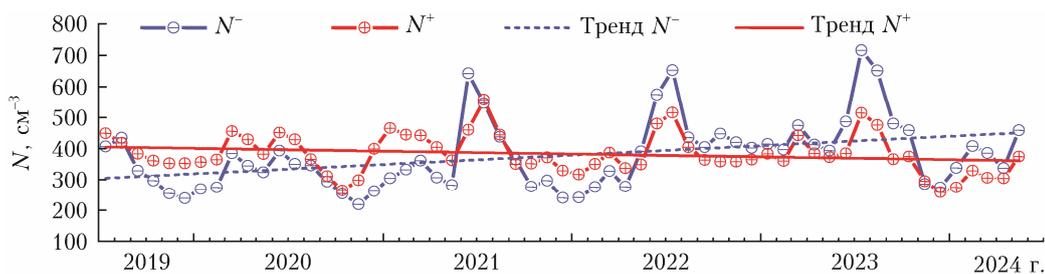


Рис. 2. Среднемесячная концентрация аэроионов и их линейные тренды в обсерватории «Фоновая»

ионов стало больше, чем положительных. Возможно, рост N^- связан с увеличением молниевой активности в последние годы [28]. Поскольку нижняя часть облака, как правило, заряжена отрицательно [29, 30], то осаждение аэрозоля из него должно увеличивать в приземном слое воздуха количество отрицательных ионов.

Ранее [5, 12] было установлено, что число положительных ионов в воздухе обычно выше, чем отрицательных, и коэффициент униполярности ($K_y = N^+/N^-$) в среднем равен 1,1. Рассчитанный по данным рис. 2 K_y представлен на рис. 3.

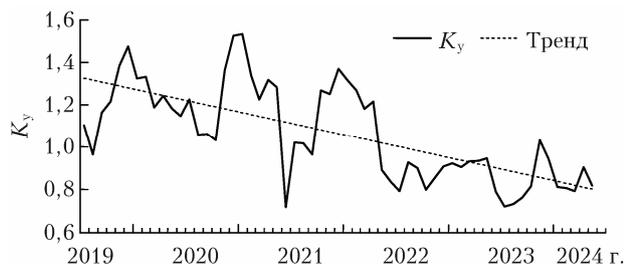


Рис. 3. Коэффициент униполярности аэроионов

Из рис. 3 видно, что в период без гроз соотношение концентрации положительных и отрицательных ионов изменялось от 0,7 до 1,55. У коэффициента униполярности имеется заметный отрицательный тренд, что, очевидно, отражает суммарную динамику разноименных ионов, выделенную на рис. 2.

Следует подчеркнуть, что подобный тренд обнаружен в бореальном лесу [31]. Было установлено, что концентрация кластерных ионов увеличивалась на 1% в год, а промежуточных – на 1,7–3,9%/год. Правда, авторы [31] не разделяли их по знаку. Если на рис. 2 взять суммарную концентрацию положительных и отрицательных ионов, то темп ее роста будет немногим более 1% в год.

Поскольку при грозах говорить об абсолютных концентрациях ионов сложно, то в таблице подсчитаны случаи, когда регистрируемая N^- превышала N^+ и наоборот. В расчет взяты только полные годы измерений. Из таблицы следует, что при увеличении повторяемости грозных событий за рассматриваемый период произошло перераспределение числа случаев превышения концентрации ионов одного знака над другим. Так, в 2020 г. было 5 случаев $N^- > N^+$ (21%), и 19 случаев $N^+ > N^-$ (79,6%).

Повторяемость превышения концентрации ионов разных знаков

Год	Количество случаев (%)		
	$N^- > N^+$	$N^+ > N^-$	Всего
2020	5 (21)	19 (79)	24
2021	7 (39)	11 (61)	18
2022	10 (48)	11 (52)	21
2023	16 (70)	7 (30)	23

В 2023 г. картина кардинально изменилась: было 16 случаев $N^- > N^+$ (70%) и 7 случаев $N^+ > N^-$ (30%). Это можно считать косвенным подтверждением гипотезы о преобладающем вкладе грозовой деятельности в тренд концентрации ионов.

Годовой ход

Среднегодовой ход концентрации ионов в обсерватории «Фоновая», рассчитанный за пятилетний период (2019–2024 г.), приведен на рис. 4. Здесь же показан график изменения K_y в течение года.

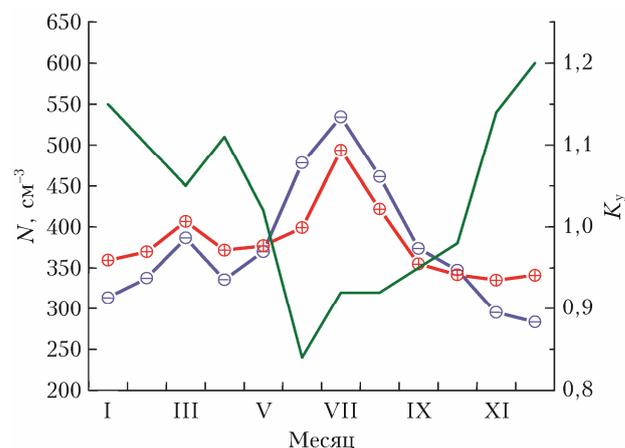


Рис. 4. Среднегодовой ход концентрации отрицательных и положительных ионов (кривые с символами) и коэффициента униполярности (сплошная кривая) в обсерватории «Фоновая»

Из рис. 4 видно, что у ионов обоих знаков наблюдается хорошо выраженный годовой ход с максимумом летом и минимумом зимой. Можно также отметить вторичный максимум в марте. В холодный период года (с октября по май) $N^+ > N^-$. С июня

по сентябрь $N^- > N^+$. Коэффициент униполярности изменяется в течение года от 0,84 до 1,15 и отражает соотношение N^+ и N^- .

Полученный годовой ход совпадает с данными, приведенными в работах [13, 32, 33], и противоположен результатам [34, 35], в которых максимум концентрации ионов наблюдается в холодное время. Такие различия в годовых вариациях аэроионов, возможно, связаны как с географическими особенностями регионов измерений, так и с разными механизмами их образования: ударным или фотоионизационным [12]. Максимум концентрации летом характерен и для других продуктов фотохимических процессов. В ходе таких процессов, например при генерации озона, наряду с нейтральными аэрозольными частицами в промежуточных циклах возникают радикалы [36]. Они были зарегистрированы недавно в ряде работ, в которых исследовалось образование заряженных частиц [37–39]. Их количество и вид зависят от газов-предшественников. В основном это органические соединения естественного происхождения.

Ранее нами уже был представлен годовой ход концентрации ионов в обсерватории «Фоновая» [40]. Он заметно отличался от приведенного на рис. 4.

Поскольку в [40] были использованы только данные для 2020 г., возможно, это следствие наблюдавшегося тогда локдауна, связанного с пандемией коронавируса. Как изменился годовой ход концентрации ионов за рассматриваемый период, показано на рис. 5.

Основной максимум концентрации ионов обоих знаков в 2020 г. наблюдался в марте, а начиная с 2021 г. и в последующие 2022 и 2023 гг. он сместился на летние месяцы. В 2020 г. содержание положительных аэроионов превышало количество отрицательных в течение всего года. В 2023 г. картина стала обратной. Почти весь период $K_y < 1$. Обращает на себя внимание и вторичный максимум концентрации ионов обоих знаков в марте (в 2020 г. — основной) во все годы, который проявился и в среднемноголетнем ходе (рис. 4). Пока сложно объяснить его природу, поскольку в этот период еще лежит снег (ноябрь — март), а вегетационная активность еще не началась, чтобы запустить фотоионизацию. Возможно, его появление связано с упоминавшейся выше электризацией снежинок во время осадков [14, 15]. Тогда возникает другой вопрос: почему этот эффект не проявляется в другие месяцы со снегопадами?

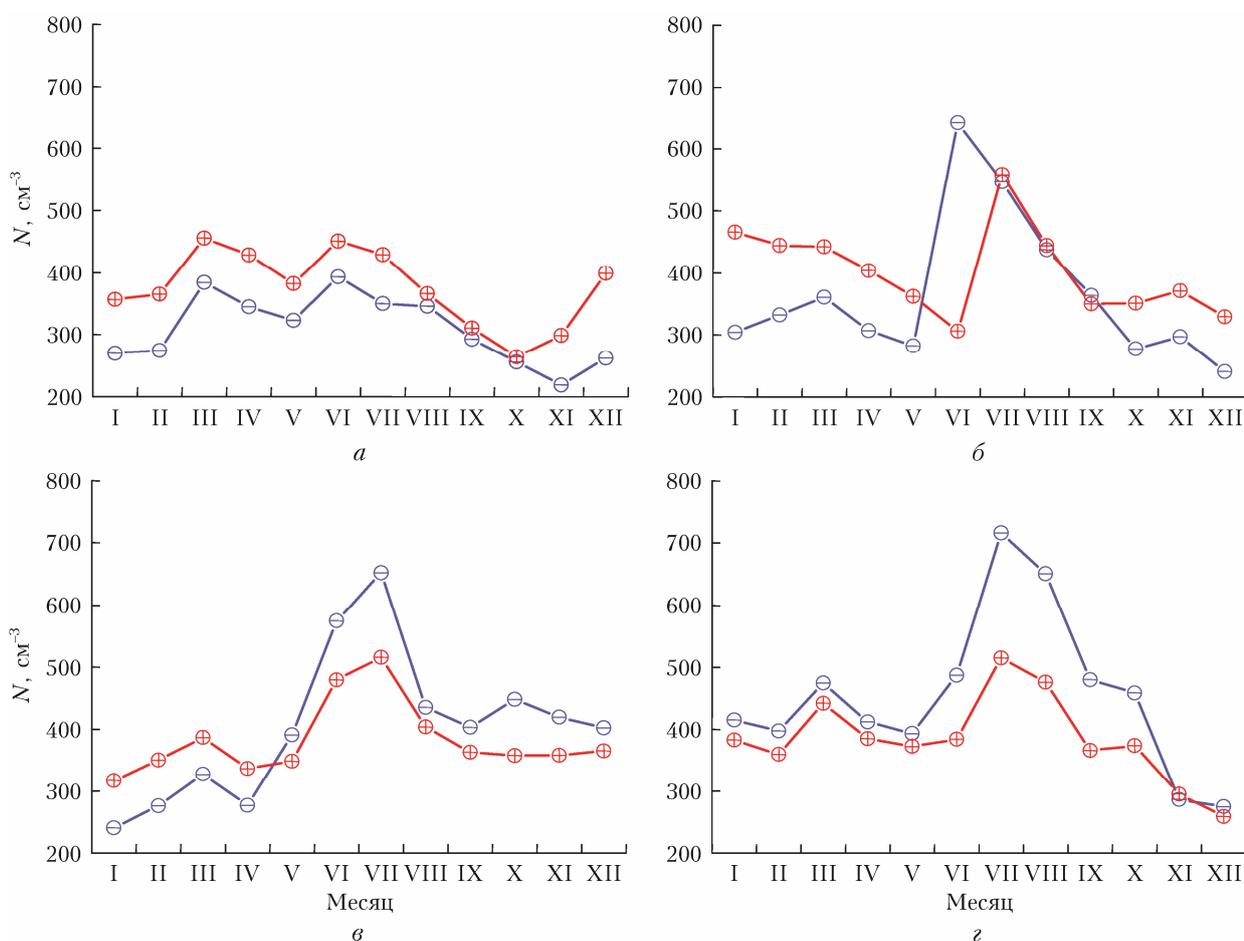


Рис. 5. Годовой ход концентрации ионов: 2020 (а), 2021 (б), 2022 (в) и 2023 гг. (г)

Суточный ход

Среднегодовой суточный ход, приведенный на рис. 6, показывает, что концентрации ионов обоих знаков изменяются синхронно, с минимумом в утренние часы и максимумом в послеполуденное время. За рассматриваемый период содержание положительных ионов в течение всех суток превышало

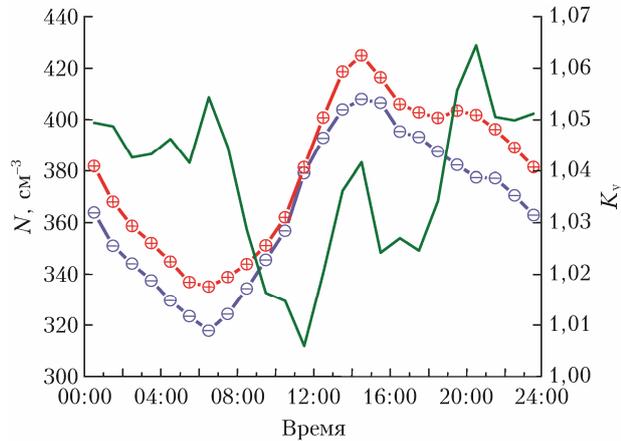


Рис. 6. Среднегодовой суточный ход концентрации отрицательных и положительных ионов (кривые с символами), а также коэффициента униполярности (сплошная кривая) в обсерватории «Фоновая» в 2019–2024 гг.

количество отрицательных. Коэффициент униполярности изменялся от 1,01 до 1,06, что почти соответствует среднему значению 1,1 [5, 12].

Подобный суточный ход аэроионов был зафиксирован в зоне бореальных лесов и в [27, 41]. Ряд работ, выполненных в Китае [42–44], выявил обратный суточный ход с максимумом концентрации ночью и минимумом днем, но эти исследования проводились в городских условиях и, возможно, сказались уровень загрязнения воздуха. Рис. 6 дает лишь общую, сильно усредненную за длительный период картину поведения аэроионов в течение суток. В реальности она значительно динамичнее. Выявленные тренды многолетних вариаций сильно изменяют соотношение N^+ и N^- год от года (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что за рассматриваемый период при сохранении типичного суточного хода заметно изменилось соотношение концентраций положительных и отрицательных ионов. Так, в 2020 г. K_y варьировался от 1,17 до 1,27. В 2023 г. количество отрицательных ионов превысило количество положительных и $K_y = 0,80–0,89$. Переходным оказался 2022 г.: в холодный период года концентрации ионов обоих знаков были соизмеримы, а в теплый стало больше отрицательных.

Не менее динамичен суточный ход соотношения ионов в разные месяцы (рис. 8).

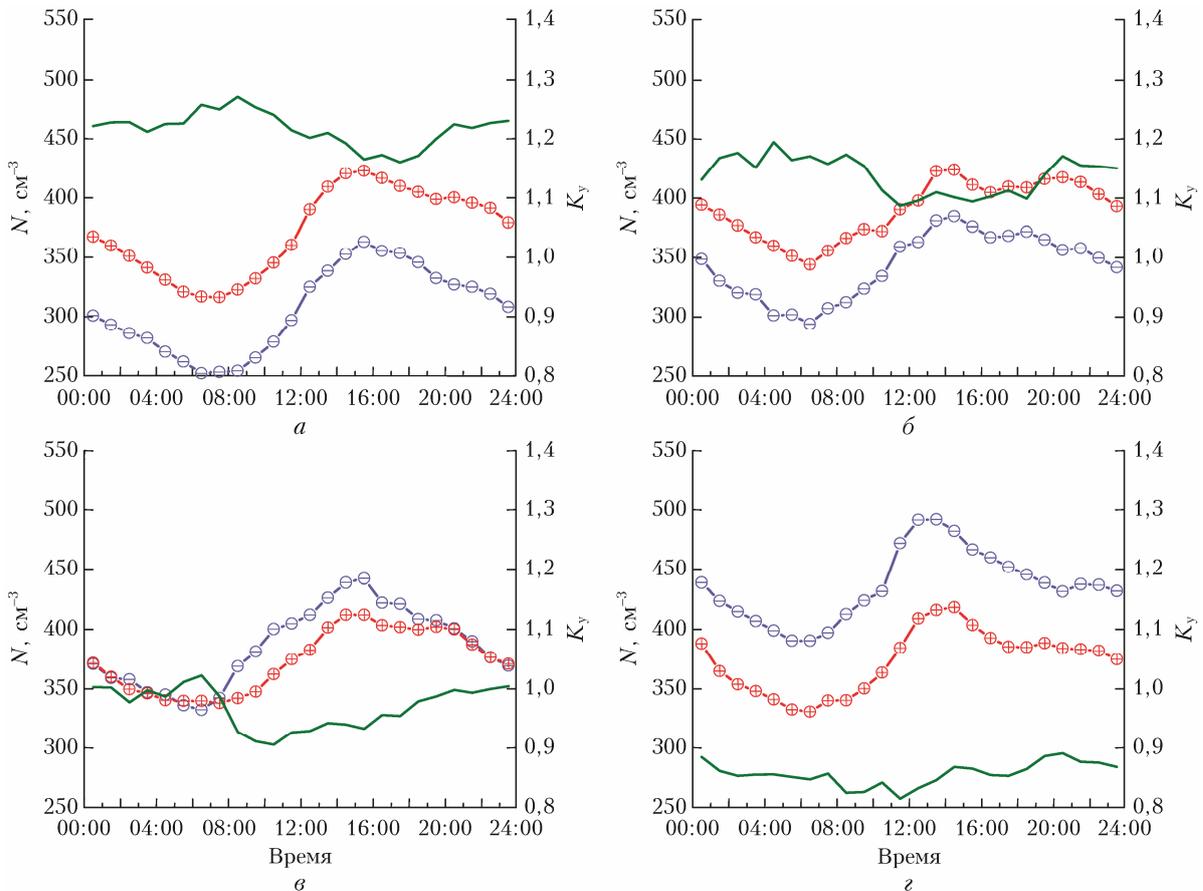


Рис. 7. Среднесуточный ход концентрации ионов (кривые с символами) и коэффициента униполярности (сплошная кривая): 2020 (а), 2021 (б), 2022 (в), 2023 г. (з)

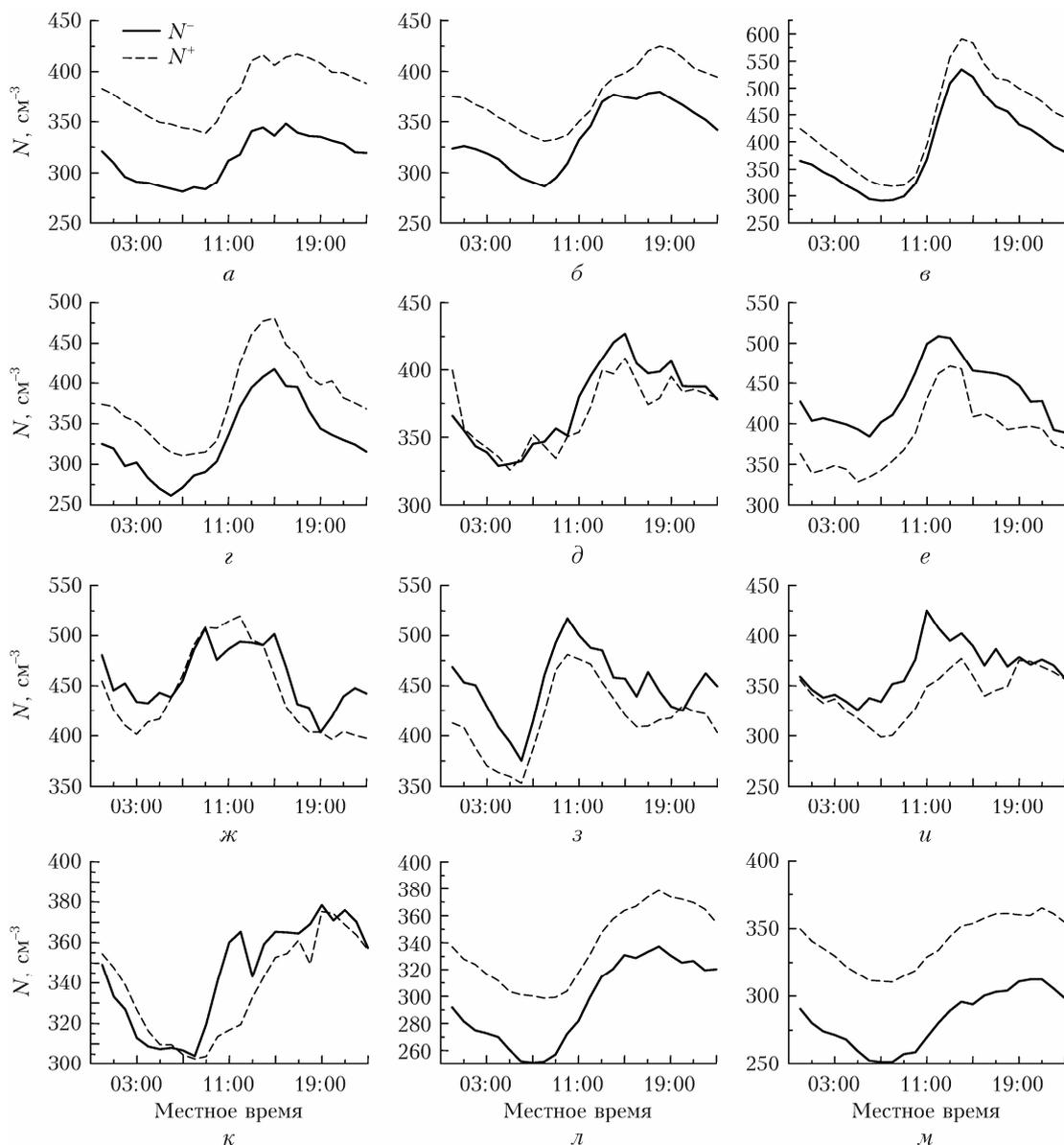


Рис. 8. Среднеголетний (2019–2024 гг.) среднесуточный ход концентрации ионов: январь (а), февраль (б), март (в), апрель (г), май (д), июнь (е), июль (ж), август (з), сентябрь (и), октябрь (к), ноябрь (л), декабрь (м)

С ноября по апрель в атмосфере преобладают положительные ионы, летом — отрицательные. Май и сентябрь являются переходными: концентрации ионов обоих знаков являются соизмеримыми. Наиболее вероятно, что такой годовой ход соотношения N^+ и N^- связан с грозовой активностью, которая наблюдается в регионе с мая по сентябрь [29].

Заключение

Проведенный анализ динамики положительных и отрицательных аэроионов в обсерватории «Фоновая» Томской области показал, что с июля 2019 г. по май 2024 г. их концентрации находились в пределах 220–720 см^{-3} . В этот период наблюдались тренды их содержания в воздухе: положительный у N^- (+7%/год) и отрицательный у N^+ (–1,2%/год).

Соотношение N^+ и N^- изменялось от 0,7 до 1,55. Коэффициент униполярности отражает отмеченные тенденции и имеет заметный отрицательный тренд.

У ионов обоих знаков наблюдается достаточно четкий годовой ход с максимумом летом и минимумом зимой. С октября по май $N^+ > N^-$, с июня по сентябрь $N^- > N^+$. Коэффициент униполярности изменяется в течение года от 0,84 до 1,15.

Среднеголетний суточный ход выявил, что концентрации ионов обоих знаков изменяются синхронно: минимум наблюдается в утренние часы, максимум — в послеполуденное время. При сохранении типичного суточного хода заметно изменялось соотношение N^+ и N^- . В 2020 г. K_y колебался от 1,17 до 1,27. В 2023 г. он стал меньше единицы (0,8–0,89). Это соотношение также изменяется в течение года. С ноября по апрель в атмосфере

преобладают положительные ионы, летом – отрицательные.

Пока данные приводятся в виде фактов о большой вариабильности концентрации атмосферных ионов. Чтобы выяснить причины этих вариаций, в дальнейшем предстоит рассмотреть влияние концентрации радона, интенсивности гамма-фона и роль атмосферных осадков.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *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. DOI: 10.5194/acpd-10-24245-2010.
2. *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. DOI: 10.5194/acpd-11-11281-2011.
3. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: АН СССР, 1955. 352 с.
4. *Розенберг Г.В., Любовева Ю.С., Горчаков Г.И.* Фоновый аэрозоль Абастумани // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1982. Т. 18, № 8. С. 822–839.
5. *Смирнов Б.М.* Электрический цикл в земной атмосфере // *Успехи физ. наук.* 2014. Т. 184, № 11. С. 1153–1176.
6. *Arnold F.* Atmospheric ions and aerosol formation // *Planetary Atmospheric Electricity.* Luxemburg: Springer Science Business Media, 2008. P. 225–238.
7. САНПИН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» // Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации N 2 от 28 января 2021 г. 1024 с.
8. *Wilson C.T.R.* Atmospheric electricity // *Nature.* 1900. V. 62, N 1598. P. 149–151. DOI: 10.1038/068102d0.
9. *Wilson C.T.R.* Nucleu and ions // *Nature.* 1903. V. 69, N 1779. P. 103–104.
10. *Harrison R.G., Tammet H.* Ions in the terrestrial atmosphere and other solar systems atmospheres // *Planetary Atmospheric Electricity.* Luxemburg: Springer Science Business Media, 2008. P. 107–118.
11. *Kazil J., Harrison R.G., Lovejoy E.R.* Tropospheric new particle formation and role of ions // *Planetary Atmospheric Electricity.* Luxemburg: Springer Science Business Media, 2008. P. 241–255.
12. *Смирнов В.В.* Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеониздат, 1992. 312 с.
13. *Komppula M., Vana M., Kerminen V.-M., Lihavainen H., Viisanen Y., Horrak U., Komsaare K., Tammet H., 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.
14. *Chen X., Virkkula A., Kerminen V.-M., Manninen H.E., Busetto M., Lanconelli C., Lupi A., Vitale V., Del Guasta M., Grigioni P., Väinänen R., Duplissy E.-M., Petaja 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. DOI: 10.5194/acp-17-13783-2017.
15. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И.* Электрические процессы в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях // *Оптика атмосфер. и океана.* 2024. Т. 37, № 6. С. 461–467. DOI: 10.15372/AOO20240603; *Gorchakov G.I., Karpov A.V., Gushchin R.A., Datsenko O.I.* Electrical processes in a wind-sand flux on desertified areas // *Atmos. Ocean. Opt.* 2024. V. 37, N 5. P. 630–636.
16. *Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О.* Моделирование регионального влияния ионов на формирование аэрозоля в атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2022. Т. 58, № 3. С. 292–299.
17. *Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О.* О влиянии атмосферных ионов на образование аэрозоля в тропосфере: численное моделирование // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2023. Т. 59, № 4. С. 467–473.
18. *Бояричук К.А.* Оценка концентрации комплексных отрицательных ионов при радиоактивном загрязнении тропосферы // *ЖТФ.* 1999. Т. 69, № 3. С. 74–76.
19. *Зукау В.В., Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Нагорский П.М.* Ионизация приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов // *Изв. ТПУ.* 2010. Т. 317, № 2. С. 171–175.
20. *Чэнсюнь Ю., Чжицянь Л., Бычков В.Л., Бычков Д.В., Голубков М.Г., Маслов Т.А., Родионов И.Д., Родионова И.П., Степанов И.Г., Уманский С.Я., Голубков Г.В.* Распределение концентраций положительных и отрицательных ионов в тропосфере // *Химическая физика.* 2022. Т. 41, № 10. С. 28–37.
21. *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.
22. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V., Kozmina A.S.* Small air ion statistics near the earth's surface // *Atmos. Res.* 2022. V. 267. P. 105913. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105913.
23. *Безруков Л.Б., Громова А.Ф., Заварзина В.П., Карпиков И.С., Курлович А.С., Лебедев Д.А., Межох А.К., Наумов П.Ю., Силаева С.В., Синёв В.В.* Наблюдение избытка положительных аэроионов в подземных полостях // *Геоматематизм и аэрономия.* 2022. Т. 62, № 6. С. 755–768.
24. *Смирнов Б.М.* Процессы атмосферного электричества // *Вестн. ОИВТ РАН.* 2023. № 12. С. 9–15.
25. *Монин А.С.* Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
26. *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 // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. P. 108337Z. DOI: 10.1117/12.2504388.
27. *Horrak U., Aalto P.P., Salm J., Komsaare K., Tammet H., Makela J.M., Laakso L., Kulmala M.* Variation and balance of positive air ion concentrations in a boreal forest // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8, N 3. P. 655–675. DOI: 10.5194/acpd-7-9465-2007.
28. *Холотцев А.В., Седов Д.В.* Климатические нормы повторяемости гроз над городами Сибири для месяцев пожароопасного сезона при современном потеплении климата // *Сибирский пожарно-спасательный вестник.* 2024. Т. 32, № 1. С. 169–182.

29. Свечникова Е.К., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Оценка распределения электрического заряда в облаке по данным о вариации потока энергичных частиц под облаком // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496, № 2. С. 198–203.
30. Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Назорский П.М., Самохвалов И.В. Электрооптические явления в атмосфере. Томск: Изд-во НТЛ, 2015. 316 с.
31. Sulo J., Lampilahti J., Chen X., Kontkanen J., Nieminen T., Kerminen V.-M., Petäjä T., Kulmala M., Lehtipalo K. Measurement report: Increasing trend of atmospheric ion concentrations in the boreal forest // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22, N 23. P. 15223–15242. DOI: 10.5194/acp-22-15223-2022.
32. 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. DOI: 10.3390/atmos9120463.
33. 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. DOI: 10.5194/acp-15-13717-2015.
34. Kalivitis N., Stavroulas I., Bougiatioti A., Kouvarakis G., Gagne S., Manninen H.E., Kulmala M., Mihailopoulos N. Night-time enhanced atmospheric ion concentrations in the marine boundary layer // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 8. P. 3627–3638. DOI: 10.5194/acp-12-3627-2012.
35. Wan X., Zhou R., Li L., Yang C., Lian J., Zhang J., Liu S., Xing W., Yuan Y. Factors influencing the concentration of negative air ions in urban forests of the Zhuayu Bay scenic area in Yangzhou, China // Atmosphere. 2024. V. 15, N 3. P. 316. DOI: 10.3390/atmos15030316.
36. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
37. 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. DOI: 10.5194/acp-21-4123-2021.
38. Yin R., Li X., Yan C., Cai R., Zhou Y., Kangasluoma J., Sarnela N., Lampilahti J., Petäjä T., Kerminen V.-M., Bianchi F., Kulmala M., Jiang J. Revealing the sources and sinks of negative cluster ions in an urban environment through quantitative analysis // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23, N 9. P. 5279–5296. DOI: 10.5194/acp-23-5279-2023.
39. Katz D.J., Abdelhamid A., Stark H., Canagaratna M.R., Worsnop D.R., Browne E.C. Chemical identification of new particle formation and growth precursors through positive matrix factorization of ambient ion measurements // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23, N 9. P. 5567–5585.
40. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Гармаш О.В., Давыдов Д.К., Демакова А.А., Ежова Е.В., Козлов А.В., Kulmala M., Lappalainen H., Petäjä T. Взаимосвязь концентрации атмосферных ионов и радона по данным измерений в обсерватории «Фоновая» // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 1. С. 12–18. DOI: 10.15372/AOO20220102; Arshinov M.Yu., Belan B.D., Garmash O.V., Davydov D.K., Demakova A.A., Ezhova E.V., Kozlov A.V., Kulmala M., Lappalainen H., Petäjä T. Correlation between the concentrations of atmospheric ions and radon as judged from measurements at the Fonovaya Observatory // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 1. P. 36–42.
41. Tuovinen S., Lampilahti J., Kerminen V.-M., Kulmala M. Intermediate ions as indicator for local new particle formation // Aerosol Res. 2024. V. 2, N 1. P. 93–105. DOI: 10.5194/ar-2024-4.
42. Huang Z., Ge X., Liu D., Tong L., Nie D., Shen F., Yang M., Wu Y., Xiao H., Yu H. Atmospheric particle number size distribution and size-dependent formation rate and growth rate of neutral and charged new particles at a coastal site of eastern China // Atmos. Environ. 2022. V. 270, N 118899. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118899.
43. Li A., Li Q., Zhou B., Ge X., Cao Y. Temporal dynamics of negative air ion concentration and its relationship with environmental factors: Results from long-term on-site monitoring // Sci. Total Environ. 2022. V. 832. P. 155057. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155057.
44. Li Z., Li C., Chen B., Hong Y., Jiang L., He Z., Liu J. Temporal dynamics of negative air ion concentrations in Nanjing Tulou scenic area // Atmosphere. 2024. V. 15, N 3. P. 258. DOI: 10.3390/atmos15030258.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov. Dynamics of the concentration of atmospheric ions according to measurements at the Fonovaya observatory.

Atmospheric ions play an important role in the formation of aerosol particles and affect public health. At the same time, measurements of their concentration in Russia are extremely insufficient. To fill the gap, the Fonovaya observatory began monitoring the ion content in July 2019. Analysis of the data obtained showed that from July 2019 to May 2024, the concentrations of both positive and negative aeroions were in the range 220–720 cm⁻³. Negative ions have a trend of +7%/year, and positive ions have a trend of –1.2%/year. Ions of both signs have a pronounced annual cycle with a maximum in summer and a minimum in winter. The long-term average daily cycle revealed that the concentrations of ions of both signs change synchronously. The minimum of their concentration is observed in the morning hours and the maximum in the afternoon. The results allow us to clarify the role of ions in atmospheric processes.