

Научная статья
УДК 551.594.1
doi: 10.17223/25421379/37/11

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В ГОРНОМ АЛТАЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В 2022–2023 гг.



Константин Николаевич Пустовалов¹, Пётр Михайлович Нагорский²,
Мария Викторовна Оглезнева³, Артыш Алашович Сат⁴, Сергей Васильевич Смирнов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*

^{1, 5} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *const.pv@yandex.ru*

² *npm_sta@mail.ru*

³ *oglezneva.m@yandex.ru*

⁴ *artysh.sat@gmail.com*

⁵ *smirnov@imces.ru*

Аннотация. Проведены комплексные исследования электрического состояния приземного слоя, включающие оценку градиента потенциала фонового электрического поля, концентрации аэроионов и определение степени влияния природных факторов (метеорологические условия, содержание аэрозоль, рельеф местности и т.д.) на территории Горного Алтая в июле 2022–2023 гг. Определены основные факторы, влияющие на изменчивость атмосферно-электрических величин в электрически невозмущенных атмосферных условиях (ясная погода) в горно-степных ландшафтах. Отмечено, что увеличение абсолютной высоты пунктов наблюдений над уровнем моря совпадает с увеличением средних значений градиента потенциала электрического поля и обусловлено различием характеристик атмосферы и кривизны (выпуклая или вогнутая) поверхности в пунктах наблюдений. Концентрация положительных аэроионов также увеличивается с ростом высоты, а отрицательных аэроионов, наоборот, уменьшается. Это увеличение, предположительно, обусловлено усилением ионизации приземного воздуха потоком галактических космических лучей и уменьшением концентрации аэрозолей в воздухе. Уменьшение концентрации отрицательных аэроионов зависит от рельефа местности, влияющего на интенсивность выноса и перемешивания аэроионов, и отсутствия дополнительных локальных источников ионизации. Среднесуточный ход градиента потенциала электрического поля в пунктах наблюдения, расположенных в котловине и на плато, хорошо согласуется (коэффициент корреляции равен 0,67), тогда как в каньоне он сильно отличается от других пунктов из-за сильного влияния на него локальных факторов. Наиболее сложный суточный ход концентраций аэроионов, особенно отрицательных, характерен для каньона, а наиболее простой – для засушливой степи.

Ключевые слова: *атмосферное электричество, приземный слой, градиент потенциала, аэроионы, Алтайские горы, рельеф*

Благодарности: авторы выражают благодарность руководству государственного природного биосферного заповедника «Убсунурская котловина» за предоставленную возможность проведения научных исследований.

Источник финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН, проект № FWRG-2021-0001 (121031300154-1).

Для цитирования: Пустовалов К.Н., Нагорский П.М., Оглезнева М.В., Сат А.А., Смирнов С.В. Электрическое состояние приземного слоя атмосферы в Горном Алтае по данным экспедиционных измерений в 2022–2023 гг. // Геосферные исследования. 2025. № 4. С. 155–172. doi: 10.17223/25421379/37/11

Original article
doi: 10.17223/25421379/37/11

THE ELECTRIC STATE OF THE SURFACE ATMOSPHERE IN THE ALTAI MOUNTAINS ACCORDING TO THE MEASUREMENT DATA IN 2022–2023

Konstantin N. Pustovalov¹, Petr M. Nagorskiy², Mariya V. Oglezneva³, Artysh A. Sat⁴, Sergei V. Smirnov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*

^{1, 5} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

¹ *const.pv@yandex.ru*

² *npm_sta@mail.ru*³ *oglezneva.m@yandex.ru*⁴ *artysh.sat@gmail.com*⁵ *smirnov@imces.ru*

Abstract. Within the framework of this paper, comprehensive studies of the electrical state of the ground layer were conducted, including an assessment of the background electric field potential gradient, concentration of air ions and determination of the degree of influence of natural factors (meteorological conditions, aerosol content, terrain, etc.) on the territory of the Altai Mountains in July 2022–2023. Field measurements were carried out at three observation sites located at different altitudes above sea level and in different terrain and landscapes. The first observation point was located on a terrace on the right bank of the Katun River in a canyon (the width is 1.5–3 km, escarpments height is about 1 km). The second observation point was located in the central part of the Chuya steppe, which is a flat intermountain basin (length 70 km, width 50 km, average height ~1800 m) with a semi-desert landscape. Site 3 was located on a highlands plateau (~2500 m) with mountainous tundra and alpine meadows near the Mongun-Taiga Mountain Massif (3976 m). Using the field measuring data in the Altai Mountains in July 2022–2023 estimates of the general and daily variability of atmospheric electrical quantities that can be approximately considered representative for the given physical and geographical conditions were obtained. The main factors influencing the variability of atmospheric-electrical quantities in electrically undisturbed atmospheric conditions (fair-weather conditions) in mountain-steppe landscapes was determined. It is noted, that the increase in the absolute altitude above sea level of observation sites coincides with an increase in the average values of the electric field potential gradient and is due to the difference in the characteristics of the atmosphere and the curvature (convex or concave) of the surface at the observation points. The concentration of positive air ion also increases with increasing altitude, and vice versa, the negative air ions concentration decreases. This increase is presumably due to increased ionization of ground air by the flow of galactic cosmic rays and a decrease in the concentration of aerosols in the air. The decrease the concentration of negative air ion depends on the terrain, which affects the intensity of the removal and mixing of air ions, and the absence of additional local sources of ionization. The average daily variation of the electric field potential gradient at observation points located in the basin and on the plateau are in good agreement (correlation coefficient is 0.67), while at the canyon it differs greatly from other points due to the strong influence of local factors on it. The most difficult diurnal cycle of air ion concentrations, especially negative ones, is characteristic of a canyon, and the simplest one is characteristic of an arid steppe.

Keywords: *atmospheric electricity, surface layer, potential gradient, air ions, Altai Mountains, terrain.*

Acknowledgment: The authors express their gratitude to the management of the Ubsunurskaya Kotlovina State Nature Biosphere Reserve for the opportunity to conduct scientific research.

Source of financing: This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, No. FWRG-2021-0001 (121031300154-1).

For citation: Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M., Oglezneva M.V., Sat A.A., Smirnov S.V. (2025) The electric state of the surface atmosphere in the Altai Mountains according to the measurement data in 2022–2023. *Geosferynye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 155–172. doi: 10.17223/25421379/37/11

Введение

В настоящее время исследование мезомасштабной изменчивости электрических характеристик атмосферы является актуальной задачей, поскольку они зависят от взаимодействия геосферных оболочек Земли, играют важную роль в атмосферных и биосферных процессах, а также участвуют в формировании благоприятной среды для проживания человека (в особенности отрицательные лёгкие ионы).

Измерения основных атмосферно-электрических величин – градиента потенциала (напряжённости) электрического поля и электропроводности воздуха дают информацию как об изменчивости электрическом состоянии приземного слоя *in situ*, так и о функционировании всей глобальной

электрической цепи (ГЭЦ) [Chalmers, 1967; Красногорская, 1972; Israël, 1973; Куповыхи др., 1998].

Одной из наиболее важных атмосферно-электрических величин является градиент потенциала (напряжённость) приземного электрического поля. Средняя суточная вариация электрического поля (унитарная вариация), которая соответствует универсальному времени и не зависит от места измерения, а также представляет собой глобальный вклад электрической активности (грозы, осадки, кучевая облачность) в районах «нарушенной погоды»¹ [Harrison, 2013]. При этом вклад региональных и локальных факторов может существенно влиять на изменчивость атмосферно-электрических величин [Bennett, Harrison, 2008; Petrov et al., 2009; Anisimov et al., 2014, 2017; Adzhiev, Kupovykh, 2015; Yaniv et

¹ Под понятием «нарушенная погода» понимаются атмосферные условия, не соответствующие условиям «хорошей погоды»: общее количество облаков ≤ 5 баллов, нет облаков нижнего яруса и вертикального развития, отсутствуют грозы,

осадки, туманы, мгла, метели, пыльные бури или задымления, средняя скорость ветра ≤ 6 м/с.

al., 2016; Afreen et al., 2020; Adzhiev et al., 2021; Tacza et al., 2021; Ahmad et al., 2021]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно варьироваться из-за различных природных и антропогенных факторов, для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости атмосферно-электрических величин в различных регионах Земли [Nicoll et al., 2019].

Плотность тока в атмосфере, текущего от ионосферы к земной поверхности, напрямую зависит от электропроводности воздуха [Rycroft et al., 2008]. В свою очередь электропроводность воздуха на 96 % определяется содержанием лёгких ионов. При этом основным стоком для лёгких ионов является оседание на аэрозольных частицах (в особенности субмикронных).

Ионы принимают участие во многих атмосферных процессах [Harrison, Tammet, 2008; Hirsikko et al., 2011]. Особая роль ионов заключается в образовании аэрозольных частиц, которые впоследствии становятся ядрами конденсации и могут влиять на электрические параметры атмосферы, погоду и климат [Nepolian et al., 2021; Hirsikko et al., 2011].

Для понимания влияния концентрации аэрозольных частиц на электрические параметры атмосферы необходимо знать источники ионов, находящихся в атмосфере Земли. Ранее исследования позволили установить как глобальные, так и локальные источники образования аэроионов. В нижней атмосфере основными ионизаторами являются фоновое радиоактивное излучение, обусловленное выходом из почвы радона и его дочерних продуктов распада, и галактические космические лучи [Harrison, Tammet, 2008; Israel 1970]. Дополнительная ионизация может происходить в результате действия локальных факторов. К ним можно отнести разбрызгивание воды (эффект Ленарда, или баллоэлектрический эффект) [Chalmers, 1952; Israël 1970], происходящее на берегах водоёмов, причем на морских происходит увеличение содержания положительных аэроионов [Blanchard, 1966], а вблизи водопадов и во время дождя – отрицательных аэроионов [Laakso et al., 2007]. Еще одним механизмом локального образования средних и тяжёлых аэроионов может служить взаимодействие молекулярных кластеров фотохимического происхождения с лёгкими ионами. По данным [Jayaratne et al., 2011; Севостьянов, Грязькин, 2016] выбросы летучих органических соединений (ЛОС) некоторыми видами растений приводят к увеличению концентрации аэроионов.

Изменчивость атмосферно-электрических величин в азиатской части России на сегодняшний день остаётся малоизученной. На огромной территории

Сибири и Дальнего Востока регулярные наблюдения за параметрами атмосферного электричества проводятся всего в пяти пунктах сети Росгидромет (г. Иркутск, г. Южно-Сахалинск, г. Диксон, г. Тикси и ст. Мыс Баранова) [Зайнетдинов, 2018] и нескольких пунктах наблюдений НИИ РАН (г. Томск [Pustovalov et al., 2022]; г. Якутск, г. Нерюнгри, г. Тикси, полигон Ойбенкель [Торопов и др., 2016; Vaishev et al., 2017]; с. Паратунка [Smirnov, 2023]). При этом пункты наблюдений расположены, главным образом, на равнинных территориях и побережьях морей. Кроме того, большинство из них находятся вблизи населённых пунктов, влияние которых неизбежно сказывается на измеряемых величинах. Эпизодические наблюдения за атмосферным электрическим полем также проводятся ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» при наблюдениях за вулканами [Firstov et al., 2020].

Наименее изученными остаются горные районы континентальных частей Сибири и Дальнего Востока, имеющие сложный рельеф и геологическое строение, а также включающие различные природные зоны и типы ландшафтов. Организация пунктов регулярных наблюдений на этих территориях сопряжена с рядом трудностей из-за их труднодоступности и малонаселённости. В связи с этим основным способом их изучения остаются экспедиционные наблюдения.

Цель данной работы – сравнительный анализ изменчивости невозмущённого электрического поля и концентрации аэроионов в электрически невозмущённых атмосферных условиях (условиях «хорошей погоды») в пунктах экспедиционных наблюдений в Горном Алтае.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на данных полевых измерений атмосферно-электрических величин (градиента потенциала электрического поля и концентрации аэроионов) в горах Алтая, на территории Республики Алтай и юго-западной части Республики Тыва. Экспедиционные работы проводились в июле 2022 и 2023 гг. в трех пунктах наблюдений (ПН), расположенных на разных высотах и в различных формах рельефа и ландшафтах (рис. 1, 2, табл. 1).

ПН-1 был размещен на террасе долины р. Катунь, на правом берегу. При этом пункт находился на равном удалении от склонов долины – отрогов Семинского (г. Сарлык, 2507 м) и Куминского (г. Ачилман, 2514 м) хребтов. Ширина долины реки в окрестностях ПН-1 изменяется от 1,5 до 3 км, а диапазон высот 0,5–1,5 км (перепад высот 1 км). ПН-2 был расположен в центральной части Чуйской степи, представляющей собой плоскую межгорную котловину с преобладанием полупустынного ландшафта.

Протяжённость Чуйской степи с севера на юг составляет ~40 км, а с запада на восток – ~70 км. ПН-3 располагался на высокогорном плато, представленном горной тундрой и альпийскими лугами, вблизи горного массива Монгун-Тайга (3 976 м). В ~2 км к западу от ПН-3 расположено крупное пресное оз. Хиндиктиг-Холь. Территория измерения ПН-3 располагалась в пределах кластерного участка «Монгун-Тайга», относящегося к государственному природному биосферному заповеднику «Убсунурская котловина».

Формы рельефа, где располагались ПН-1–ПН-3, можно отнести к следующим типам: V-образная горная речная долина, котловина и плато соответственно

(рис. 2). Поскольку Чуйская котловина является относительно ровной и имеет большую протяжённость, а ПН-2 был расположен вблизи её центра, то местность в окрестностях этого пункта можно считать плоской поверхностью. Окрестности ПН-3 можно рассматривать как поверхность с незначительной кривизной. Несмотря на то, что в целом плато считается выпуклой формой рельефа, его центральная часть, где расположен ПН-3, имеет слабую расчленённость и малый уклон. В отличие от предыдущих пунктов, подстилающая поверхность в окрестностях ПН-1 имеет значительную кривизну – сильно вогнута. Причём отношение превышения склонов долины над ПН-1 составляло от 1/3 до 1/2 расстояния до них. Фотографии окрестностей ПН представлены на рис. 3.

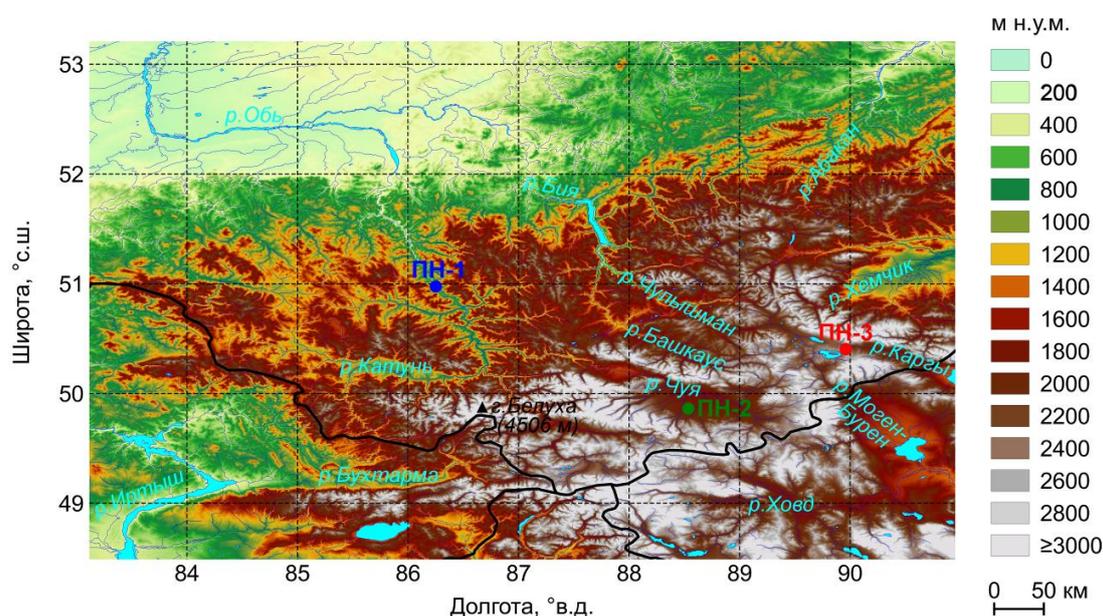


Рис. 1. Территория исследования и расположение на ней ПН-1–ПН-3 (1–3). На заднем плане абсолютная высота местности по данным цифровой модели рельефа GLOBE [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globeget.html]

Fig. 1. Locations of the study region and observation sites 1–3. The maps are shown based on the global digital elevation model GLOBE [https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globeget.html]

Описание пунктов наблюдений

Таблица 1

Description of observation points

Table 1

ПН	Расположение	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Высота н.у.м., м	Период наблюдений
1	Россия, Республика Алтай, Чемальский район	50,98	86,27	550	18–23.07.2023
2	Россия, Республика Алтай, Кош-Агачский район	49,84	88,54	1930	9–16.07.2023
3	Россия, Республика Тыва, Монгун-Тайгинский кожуун	50,35	89,95	2490	24–29.07.2022

Экспедиционные работы в описанных выше пунктах проводились, главным образом, при антициклональных синоптических условиях, с которыми была связана ясная или малооблачная погода. Длительность измерений градиента потенциала электрического поля в каждом пункте определялась погодными условиями и составила 5–7 сут (табл. 1). Для проведения экспедиционных работ в каждом из пунктов выбирались открытые однородные участки, репрезентативные для значительной территории и мало подверженные антропогенному влиянию. Измерение градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi = d\varphi/dz = -E_z$, где φ и E_z – потенциал и вер-

тикальная компонента напряжённости электрического поля) выполнялось с помощью портативного флюксметра EFS-2/50 (ООО «НТЦР», Россия). Данный флюксметр был откалиброван с помощью калибровочного стенда (плоского конденсатора) и приведён к показаниям флюксметра CS110 (Campbell Scientific, США) [https://www.campbellsci.com/cs110], работающего в режиме мониторинга в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН [https://imces.ru/index.php?rm=news&action=view&id=899]. EFS-2/50 измеряет $\nabla\varphi$ в диапазоне $0 \dots \pm 20$ кВ/м, с погрешностью $\pm 1\%$ и временным разрешением 1 с. Флюксметр располагался на заземлённом штативе-треноге на высоте 2 м.

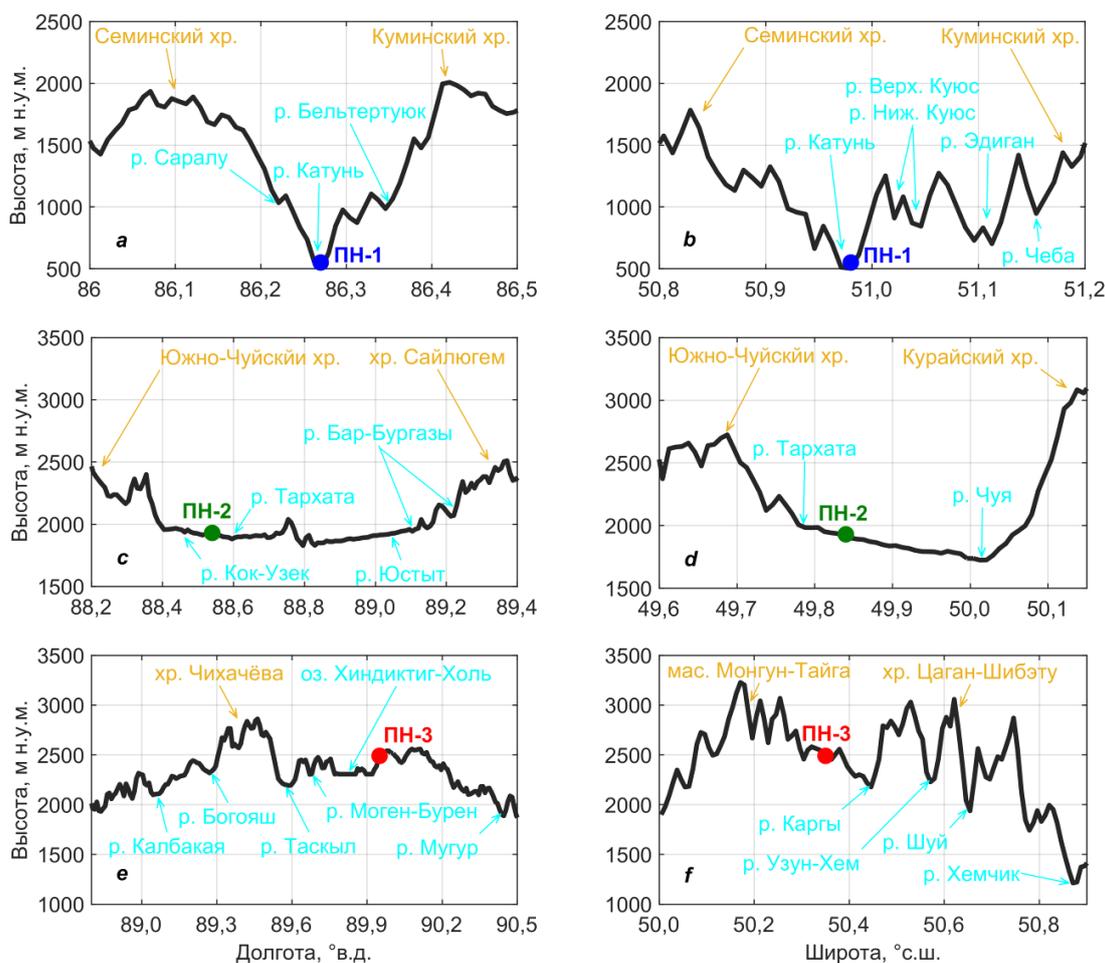


Рис. 2. Долготные (а, с, е) и широтные (b, d, f) профили абсолютной высоты (по данным GLOBE) в окрестностях ПН-1 (а, b), ПН-2 (с, d) и ПН-3 (е, f) соответственно

Fig. 2. West–east (a, c, e) and North–south (b, d, f) profiles indicating variation of absolute height (based on the global digital elevation model GLOBE) near site 1 (a, b), site 2 (c, d) and site 3 (e, f)

Регистрация концентраций положительных (n_+) и отрицательных (n_-) аэроионов производилась счётчиками аэроионов Air Ion Counter Model AIC2 (AlphaLab, США) [https://www.alphalabinc.com/

products/aic2/]. AIC2 представляет собой измеритель счётной концентрации ионов, основанный на конструкции трубчатого конденсатора Гердиена и оснащенный вентилятором, который протягивает воздух

через измеритель с калиброванной скоростью. АIC2 измеряет счётную концентрацию в воздухе положительных или отрицательных ионов, подвижность которых превышает $1 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Диапазон измерения концентраций ионов составляет $0 \dots 2 \text{ млн см}^{-3}$, точность – $\sim 20 \%$, временное разрешение – 1 с. Использовались два счётчика АIC2, первый из которых измерял n_+ , а второй – n_- . Счётчики размещались на штативах-треногах на высоте 1 м.

Кроме измерения градиента потенциала электрического поля и ионов в каждом из пунктов также производились параллельные измерения основных метеорологических величин и энергетической освещённости в УФ- и видимой областях спектра, содержания аэрозольных частиц ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) в воздухе, а также характеристик естественного радиационного фона.

Основные метеорологические величины (температура (t) и относительная влажность (f) воздуха, скорость (V) и направление (D) ветра, суммарная солнечная радиация (Q), атмосферное давление, количество осадков и др.) измерялись с помощью автоматической метеостанции АW003 (Аmtast, США) [<https://amtast.com/>] с 1-минутным усреднением.

Приземное содержание субмикронных аэрозольных частиц измерялось с помощью лазерного датчика SDS011 (Shandong Nova Technology, Китай) [<https://www.sdnftech.com/sds011-laser-pm2-5-sensor-product/>]. SDS011, используя принцип светорассеяния, измеряет массовую концентрацию частиц размером $0,3\text{--}10 \text{ мкм}$ в воздухе, на основании чего рассчитываются суммарные концентрации аэрозоля диаметром менее $2,5$ и 10 мкм ($PM_{2.5}$ и PM_{10}). Диапазон измерения $PM_{2.5}$ и PM_{10} составляет $0 \dots 999 \text{ мкг/м}^3$, точность – 15% .

Для косвенной оценки содержания аэрозоля во всём столбе атмосферы, соответствующего измерениям $\nabla\phi$ и n_{\pm} , были использованы данные многоканального фильтрового радиометра NILU-UV-6T (NILU, Норвегия). Радиометр измеряет энергетическую освещённость в ультрафиолетовой (УФ) и видимой спектральных областях на длинах волн $305, 312, 320, 340$ и 380 нм и в диапазоне $400\text{--}700 \text{ нм}$. Прилагаемое к прибору программное обеспечение позволяет рассчитывать средние, максимальные и суммарные суточные значения энергетической освещённости в областях УФ-А ($315\text{--}400 \text{ нм}$), УФ-В ($280\text{--}315 \text{ нм}$), фотосинтетически активного излучения ($400\text{--}700 \text{ нм}$), эритемного и биологически активного УФ-излучения, общее содержание озона, а также прозрачность атмосферы на длине волны 340 или 380 нм (CLT), обусловленную облачностью и атмосферным аэрозолем. Поскольку в условиях хорошей погоды

наличие нижней облачности исключается, то изменение CLT обусловлено, главным образом, изменением содержания аэрозоля в столбе атмосферы. В данной работе были использованы значения CLT , рассчитанные для 380 нм : $CLT_{380} = E_{e(\text{изм.})} / E_{e(\text{ясно})} \times 100\%$, где $E_{e(\text{изм.})}$ и $E_{e(\text{ясно})}$ – измеряемая и модельная (ясное небо) энергетическая освещённость.

Для автоматической записи состояния неба и облачного покрова использовалась «all-sky»-камера (камера всего неба). Была использована уличная панорамная IP-камера (SUSIKUM, Китай) с углом обзора 180° , размером сенсора 2 Мп (1920×1080 ; Full HD) и частотой работы около 25 Гц . Камера устанавливалась вертикально на штативе-треноге на высоте 2 м . Запись видеопотока производилась с помощью АHD-видеорегистратора А1004LME (AZISHN, Китай).

Портативные компьютеры (ноутбуки), с помощью которых производилась настройка и запись данных некоторых из приборов, с целью защиты от осадков, ветра и пыли располагались в небольшой палатке полусферической формы на расстоянии около $10\text{--}20 \text{ м}$ от приборов. Электропитание приборов и компьютерной техники в экспедиционных условиях обеспечивалось бензогенератором, который был расположен на расстоянии более 50 м от измерительного оборудования с подветренной стороны. Расположение экспедиционного оборудования в ПН представлено на рис. 3.

Анализ экспериментальных данных заключался в проведении дескриптивного и корреляционно-регрессионного анализа изменчивости $\nabla\phi$ в пунктах наблюдений как для всех периодов наблюдений, так и для отдельных часовых интервалов. Если за периоды наблюдений отмечались интервалы времени с нарушением условий «хорошей погоды», то они исключались из анализа. Обработка и анализ данных выполнялись в пакете MATLAB (The MathWorks).

Результаты и их обсуждение

Общая изменчивость градиента потенциала электрического поля. Как видно из рис. 4 и табл. 2, среднее значение $\nabla\phi$ в ПН-1 составляет 48 В/м (медиана 47 В/м), а типичный диапазон изменчивости, ограниченный интервалом $P_{25}\text{--}P_{75}$, – $37\text{--}56 \text{ В/м}$. В ПН-2 среднее значение $\nabla\phi$ равно 83 В/м (медиана 82 В/м), а типичный диапазон изменчивости – $64\text{--}99 \text{ В/м}$. В ПН-3 $\nabla\phi$ в среднем составляет 115 В/м (медиана 112 В/м) и, как правило, колеблется в пределах $96\text{--}129 \text{ В/м}$. Модальные значения градиента потенциала в ПН-1, ПН-2 и ПН-3 приходятся на интервалы $40\text{--}50$, $80\text{--}90$ и $100\text{--}110 \text{ В/м}$ соответственно.



Рис. 3. Расположение измерительного оборудования в пунктах наблюдений 1–3 (а–с)

Fig. 3. Pictures of observation sites: 1 (a), 2 (b), 3 (c)

При сравнении изменчивости градиента потенциала в ПН отметим следующее. Наименьшие значения градиента потенциала летом в условиях «хорошей погоды» отмечаются в ПН-1, имеющем самую низкую высоту над уровнем моря (~600 м) и расположенном в V-образной горной долине. Наибольшие значения $\nabla\varphi$, наоборот, характерны для пункта с самой большой абсолютной высотой – ПН-3 (~2500 м), который находился на плато. Для ПН-2, имеющего промежуточную высоту (~1900 м) и расположенного на относительно плоской поверхности (в центральной части котловины), характерны значения градиента потенциала большие чем в ПН-1, но меньшие чем в ПН-3.

Согласно рис. 4, распределения вероятностей $\nabla\varphi$ в ПН-2 и ПН-3 в целом описываются нормальным законом и имеют подобный вид, однако в последнем из них мода смещена на ~20 В/м относительно первого. Форма подстилающей поверхности в ПН-2 и ПН-3 в целом подобна, однако значительно отличаются абсолютная высота и характеристики атмосферы. Так,

например, среднее атмосферное давление в последнем на ~75 гПа ниже, а прозрачность атмосферы на длине волны 380 нм в послеполуденные часы на ~15 % выше, чем в первом. Предположительно, рост градиента потенциала с абсолютной высотой обусловлен снижением интегрального содержания аэрозоля и, как следствие, электрического сопротивления столба атмосферы.

В ПН-1, где зарегистрированы наименьшие модальные (средние) значения градиента потенциала электрического поля $\nabla\varphi$, значения прозрачности атмосферы CLT_{380} в послеполуденные часы также являются наименьшими, что подтверждает сделанное выше предположение о связи приземного электрического поля и прозрачности атмосферы (интегрального содержания аэрозоля). Однако в отличие от ПН-2 и ПН-3 распределение $\nabla\varphi$ в ПН-1 значительно отличается от нормального – оно является островершинным (имеет положительный эксцесс). При этом размах значений $\nabla\varphi$ в ПН-1 почти в ~2 раза меньше, чем в ПН-2 и ПН-3 (рис. 4),

что можно объяснить дополнительным влиянием кривизны подстилающей поверхности на приземное электрическое поле. Поскольку данный пункт расположен в вогнутой форме рельефа с соотношением глубины и

ширины $\sim 1/2$, то в нём должно происходить разряжение силовых линий электрического поля и, как следствие, занижение градиента потенциала относительно плоской поверхности на той же высоте.

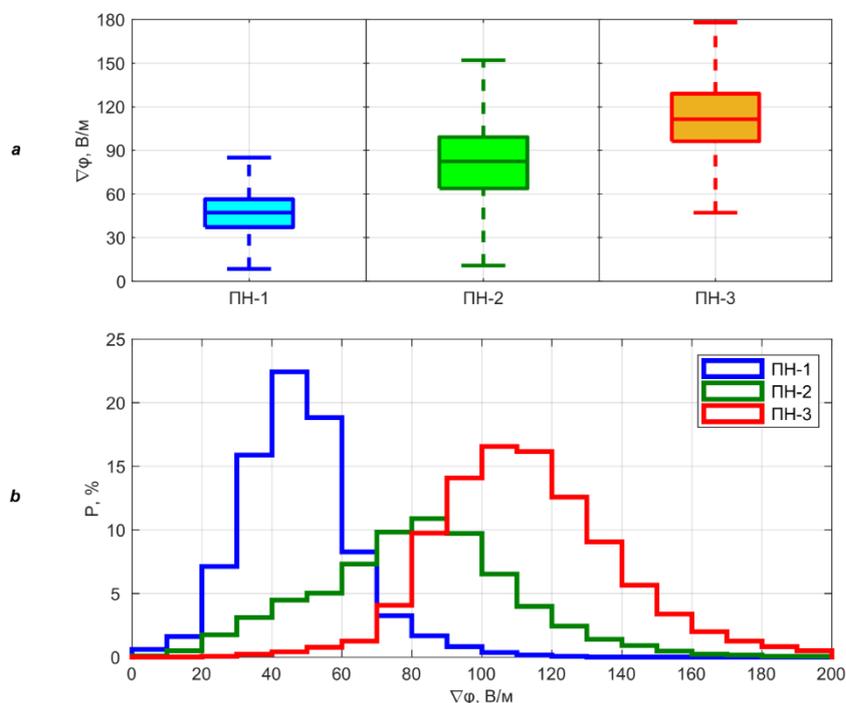


Рис. 4. Диаграммы изменчивости (а) и объединённые гистограммы распределения (б) значений $\nabla\phi$ в ПН

Fig. 4. Box plot (a) and histogram (b) of the distribution of $\nabla\phi$ at observation sites

Таблица 2

Основные статистические характеристики изменчивости $\nabla\phi$ в ПН по данным измерений в 2022–2023 гг.

Table 2

Main statistical parameters of amount variation of $\nabla\phi$ at sites based on measurement data in 2022–2023

Статистическая характеристика	ПН-1	ПН-2	ПН-3
Среднее	48	83	115
Медиана	47	82	112
Среднеквадратическое отклонение	16	32	31
Межквартильный размах	19	35	33
5-й процентиль	24	34	77
25-й процентиль	37	64	96
75-й процентиль	56	99	129
95-й процентиль	77	131	164

Таким образом, на основании проведенных измерений можно сделать вывод о том, что в Горном Алтае с увеличением абсолютной высоты местности отмечается возрастание приземного электрического поля, которое обусловлено как изменением характеристик атмосферы (в частности, ростом прозрачности атмосферы), так и изменением кривизны поверхности (вогнутая, плоская и выпуклая). Для определения

вклада в формирование приземного электрического поля конкретных факторов требуются дополнительные исследования, в том числе с привлечением численного моделирования.

Кроме того, отмечено, что возрастание градиента потенциала с высотой происходит нелинейно. Так, приращение средних арифметических значений градиента потенциала от ПН-1 к ПН-2 и от ПН-2 к ПН-3

имеют близкие значения – 35 и 32 В/м, хотя соответствующие изменения абсолютной высоты составляют 1380 и 560 м. Исходя из этого значение производной $\nabla\varphi$ по высоте в последнем случае в ~2,5 раза больше, чем в первом. Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод о том, что скорость приращения приземного электрического поля при увеличении абсолютной высоты также возрастает.

Общая изменчивость концентрации аэроионов. Согласно табл. 3, среднее арифметическое значение n_+ в ПН-1 равно $19 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (медиана $3,3 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$), а типичный диапазон её изменчивости, ограниченный интервалом $P_{25}-P_{75}$, составляет $(2-6,5) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. В ПН-2 среднее значение n_+ составляет $13 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (медиана $3,6 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$), а типичный диапазон изменчивости – $(2,5-6,7) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. В ПН-3 n_+ в

среднем равна $35 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (медиана $6,5 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$) и, как правило, изменяется в диапазоне $(4,4-30) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Модальные значения n_+ в ПН-1, ПН-2 и ПН-3 приходятся на интервалы $(1-2) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, $(2-3) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ и $(4-5) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ соответственно (рис. 5).

Среднее арифметическое значение n_- в ПН-1 равно $5,3 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (медиана $1,8 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$), а типичный диапазон её изменчивости (интервал $P_{25}-P_{75}$) составляет $(1,2-2,7) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (табл. 3). В ПН-2 среднее значение n_- составляет $1,9 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (медиана $1,6 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$), а типичный диапазон изменчивости – $(0,7-2,8) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. В ПН-3 n_- в среднем равна $0,6 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (медиана $0,3 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$) и, как правило, изменяется в диапазоне $(0,1-0,9) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Модальные значения n_- в ПН-1 приходятся на интервал $(1-2) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, а в ПН-2 и ПН-3 – менее $1 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (рис. 6).

Таблица 3

Основные статистические характеристики изменчивости n_{\pm} (10^3 см^{-3}) в ПН по данным измерений в 2022–2023 гг.

Table 3

Main statistical parameters of amount variation of n_{\pm} (10^3 cm^{-3}) at sites based on measurement data in 2022–2023

Статистическая характеристика	ПН-1		ПН-2		ПН-3	
	n_+	n_-	n_+	n_-	n_+	n_-
Среднее	19	5,3	13	1,9	35	0,6
Медиана	3,3	1,8	3,6	1,6	6,5	0,3
Среднеквадратическое отклонение	61	37	34	1,4	78	0,6
Межквартильный размах	6,5	1,5	4,3	2,1	26	0,8
5-й процентиль	1,0	0,4	0,9	0,2	3,0	0,04
25-й процентиль	2,0	1,2	2,5	0,7	4,4	0,1
75-й процентиль	8,5	2,7	6,7	2,8	30	0,9
95-й процентиль	120	9,5	62	4,3	200	1,9

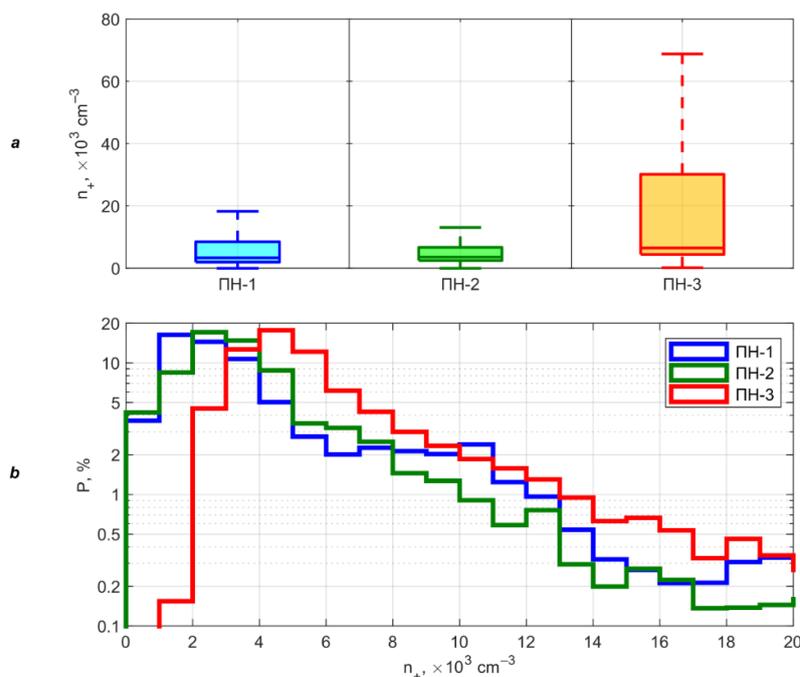


Рис. 5. Диаграммы изменчивости (а) и объединённые гистограммы распределения (б) значений n_+ в ПН

Fig. 5. Box plot (a) and histogram (b) of the distribution of the n_+ at observation sites

Распределения вероятностей положительных ионов n_+ во всех ПН приближенно можно описать степенной функцией (рис. 2). Во всех распределениях отмечается «тяжелый хвост». Согласно рис. 5, при увеличении значений n_+ в ПН-2 и ПН-3 их повторяемость логарифмически уменьшаются. При этом в ПН-1, расположенном в горной речной долине, распределение значений n_+ имеет более сложный вид, чем в ПН-2 и ПН-3. В частности, уменьшение повторяемости n_+ с ее увеличением происходит значительно медленнее, чем в ПН-2 и ПН-3, также в на диаграмме отмечаются дополнительные моды в интервалах $(10-11) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ и $(19-20) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Для ПН-1 также характерно логарифмическое распределение отрицательных ионов n_- (рис. 6). При этом в распределениях n_- в ПН-2 и ПН-3 «тяжелый хвост» отсутствует, а повторяемость значений быстро снижается при их увеличении. Высокая скорость уменьшения повторяемости (производная от функции распределения) значений n_- отмечается в ПН-3, расположенном на плато и имеющем наиболь-

шую абсолютную высоту. Отмеченные выше особенности распределения n_+ и n_- в ПН-1, вероятно, можно объяснить влиянием локальных факторов в окрестностях этого пункта. Так, на расстоянии менее 500 м от ПН-1 протекает р. Катунь, имеющая на данном участке множество порогов (см. рис. 1, 2). Кроме того, согласно данным ГИН РАН [<http://neotec.ginras.ru/database.html>], вдоль долины р. Катунь проходит активный тектонический разлом. При направлениях ветра от этих дополнительных источников ионизации воздуха может происходить рост n_{\pm} в ПН-1.

При сравнении полученных оценок n_+ в пунктах наблюдений отметим следующее. Минимальные медианные значения n_+ летом в условиях «хорошей погоды» отмечены в ПН-1 с наименьшей абсолютной высотой и расположенном в сильно вогнутой форме рельефа (горная речная долина). Высокие средние значения n_+ в ПН-1 по сравнению с ПН-2 обусловлены влиянием «тяжелого хвоста», при котором в ПН-1 n_+ (P_{95}) в ~ 2 раза выше, чем в ПН-2.

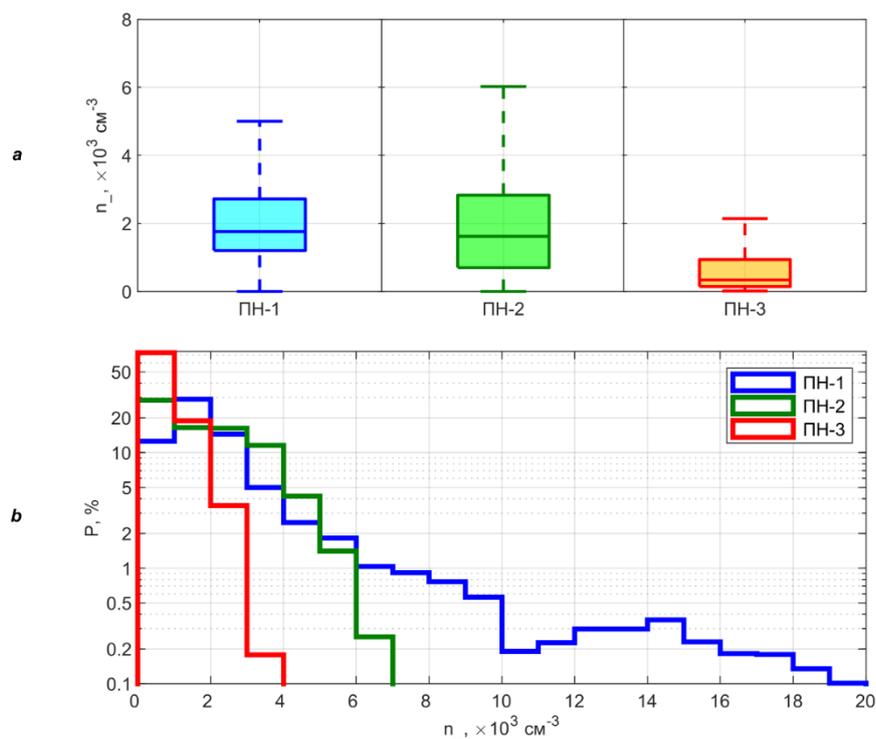


Рис. 6. Диаграммы изменчивости (а) и объединённые гистограммы распределения (б) значений n_- в ПН

Fig. 6. Box plot (a) and histogram (b) of the distribution of the n_- at observation sites

Наибольшие средние арифметические и медианные значения n_+ зарегистрированы в пункте с наибольшей абсолютной высотой – ПН-3. Модальные значения n_+ , так же как и медианы, возрастают при переходе от ПН-1 к ПН-2 и ПН-3. Рост n_+ с увеличением абсолютной высоты местности, но на фиксированной высоте над подстилающей поверхностью (1 м) может объясняться следующими причинами.

Известно, что в атмосфере с увеличением высоты над уровнем моря возрастает плотность потока галактических космических лучей (ГКЛ).

Этот процесс возрастания плотности потока ГКЛ способствует увеличению суммарной интенсивности ионизации воздуха, при этом интенсивность ионизации радоном и его дочерними продуктами распада остается неизменной.

В этом случае большинство образовавшихся положительных ионов под влиянием электродного эффекта в условиях «хорошей погоды» будут накапливаться в приземном слое (вблизи «электрода»), приводя к возрастанию n_+ . Кроме того, во всех ПН отмечаются очень низкие значения концентрации аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} . При переходе от ПН-1 к ПН-2 и ПН-3 они значительно (в 1,5–2 раза) уменьшаются. Как следствие, сток ионов на аэрозоль в пунктах наблюдений незначителен и при переходе от горной долины к котловине и плато он ослабевает, способствуя возрастанию n_+ .

Анализ полученных значений n_- показал обратную зависимость от абсолютной высоты – максимальные средние арифметические (медианные) значения n_- отмечаются в ПН-1, минимальные – в ПН-3, а промежуточные – в ПН-2. Модальные значения n_- также уменьшаются при переходе от ПН-1 к ПН-2 и ПН-3. Вероятно, уменьшение значений n_- с увеличением абсолютной высоты местности связано со следующими условиями. Отрицательные ионы, образовавшиеся в результате ионизации молекул воздуха, в отличие от положительных, не задерживаются в приземном слое, а выносятся в более высокие слои атмосферы под влиянием нескольких факторов: электродного эффекта (в условиях «хорошей погоды»), конвективного переноса и турбулентного перемешивания. Увеличение общей интенсивности ионообразования за счет дополнительных источников/процессов может способствовать повышению n_- в приземном слое. Так, вблизи ПН-1 находится бурная горная река и активный тектонический разлом, которые могут способствовать дополнительному ионообразованию, а сам пункт расположен в узкой горной долине (рис.

1 и 2). Вогнутые формы рельефа также могут способствовать повышению n_- : здесь имеет место пониженные величины приземного электрического поля (см. выше), а слабый воздухообмен и, как следствие, более медленный вынос отрицательных ионов в вышележащие слои атмосферы способствуют накоплению n_- .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при увеличении высоты местности над уровнем моря в Горном Алтае происходит увеличение концентрации положительных ионов (медианных и модальных значений) и уменьшение отрицательных (средних арифметических, медианных и модальных значений). Увеличение n_+ с ростом абсолютной высоты, вероятно, обусловлено усилением общей ионизации воздуха ГКЛ и снижением концентрации аэрозольных частиц в воздухе, а уменьшение n_- – формой рельефа и отсутствием дополнительных локальных источников ионизации (горная река, водопад, тектонические разломы и др.), наиболее сильно влияющих на концентрацию отрицательных ионов.

Суточная изменчивость градиента потенциала электрического поля. Согласно рис. 7, в ПН-2 и ПН-3 суточный ход градиента потенциала хорошо согласуется (коэффициент корреляции Пирсона равен 0,67). Основной максимум суточного хода $\nabla\varphi$ в этих ПН приходится на послеполуденные и вечерние часы (~16.00 и 17.00 местного времени соответственно), а основной минимум отмечается вблизи полуночи (~23.00 и 00.00 соответственно). Кроме того, в ПН-2 и ПН-3 во время интенсивного прогрева подстилающей поверхности и приземного воздуха (~08.00–12.00; рис. 7, 8) прослеживается быстрое возрастание градиента потенциала с последующим небольшим снижением – вторичный максимум и минимум.

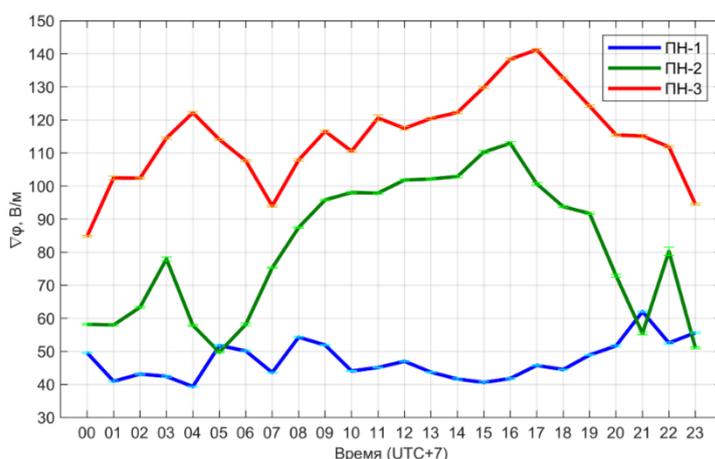


Рис. 7. Суточные вариации среднечасовых значений $\nabla\varphi$ в ПН. На рисунках ширина доверительного интервала соответствует $\pm t \cdot \delta$, равному произведению t -значения Стьюдента (t) и стандартной ошибки среднего ($\delta = \sigma/\sqrt{N}$, где σ – среднеквадратическое отклонение, N – длина выборки)

Fig. 7. Diurnal variation in hourly means of $\nabla\varphi$ at observation sites.

In the figures, the width of the confidence interval $\pm t \cdot \delta$ is determined by the multiplication of the Student's t -value (t) and the standard error of the mean ($\delta = \sigma/\sqrt{N}$, where σ – standard deviation, N – sample length)

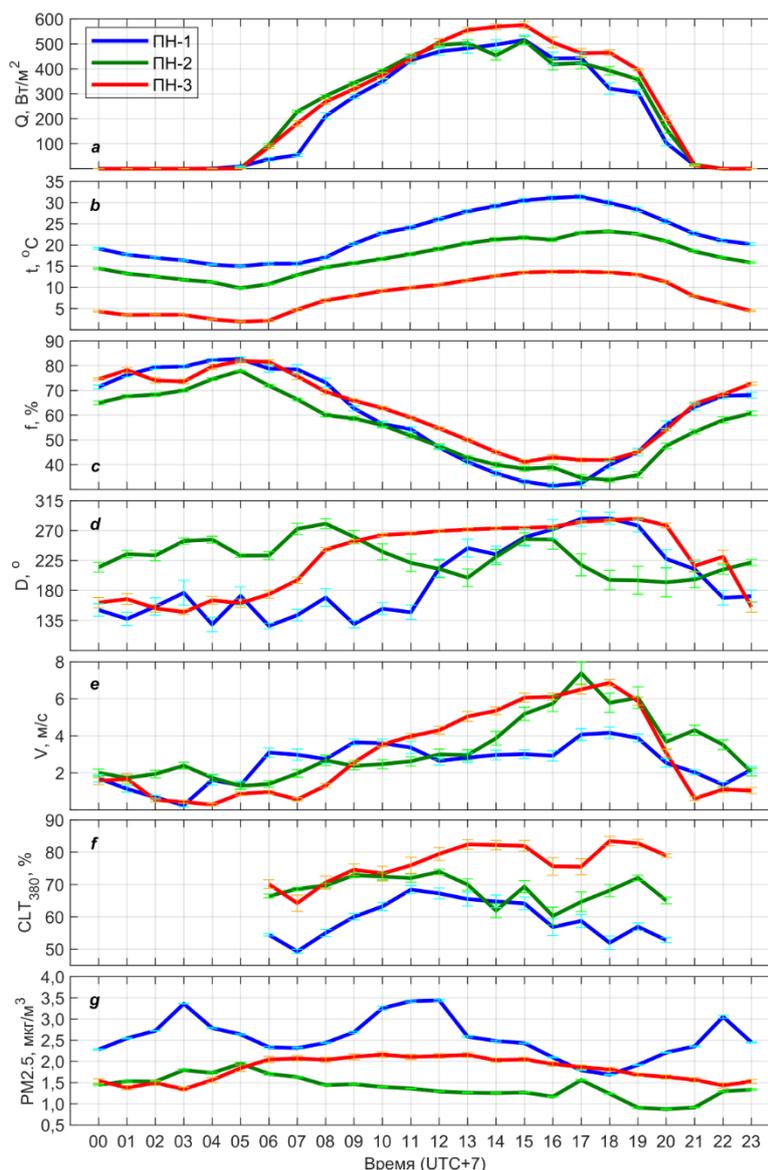


Рис. 8. Суточные вариации среднечасовых значений потока суммарной солнечной радиации (а), температуры воздуха (б), относительной влажности воздуха (с), направления ветра (д), скорости ветра (е) прозрачности атмосферы на длине волны 380 нм (ф), массовой концентрации аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ (г) в ПН

Fig. 8. Diurnal variation in hourly means of solar irradiance (a), air temperature (b), relative humidity (c), wind direction (d), wind speed (e), atmospheric transparency at 380 nm (f), mass concentration of $PM_{2.5}$ (g) at observation sites

Отмеченные выше экстремумы отсутствуют в унитарной вариации электрического поля, но при этом отмечаются во многих континентальных пунктах наблюдений, в особенности в городских [Israël, 1973; Yaniv et al., 2016; Afreen et al., 2020; Ahmad et al., 2021; Pustovalov et al., 2022]. Они обусловлены действием конвективного генератора – увеличением концентрации аэрозоля и уменьшением локальной проводимости при развитии конвекции [Anisimov et al., 2017].

Однако в исследуемых ПН эти экстремумы выражены значительно слабее, чем в ближайшем стационарном пункте наблюдений $\nabla\varphi$ (ГО ИМКЭС; г. Томск) [Pustovalov et al., 2022].

Предположительным объяснением этого является меньшая по сравнению с городским пунктом наблюдения аэрозольная загрязнённость в ПН-2 и ПН-3. Кроме того, в ПН-2 и ПН-3 перед рассветом (~3.00 и 4.00 соответственно) отмечается дополнительный

ярко выраженный максимум, который, наоборот, не отмечается в ГО ИМКЭС, но примерно соответствует максимуму кривой Карнеги. Данный эффект сложно объяснить влиянием только локальных факторов (см. рис. 8). При этом он наиболее сильно проявляется на высокогорном плато (ПН-3). Исходя из вышесказанного, можно предположить, что максимум перед рассветом связан с проявлением унитарной вариации.

Суточная изменчивость градиента потенциала электрического поля в ПН-1 значительно отличается от ПН-2 и ПН-3 (коэффициент корреляции Пирсона равен $-0,40$ и $-0,30$ соответственно). В частности, основной максимум $\nabla\varphi$ выражен слабо и сдвинут на позднее вечернее время (~ 21.00). Он отмечается на 5 и 4 ч позднее чем в ПН-2 и ПН-3. При этом время наступления основного максимума $\nabla\varphi$ в ПН-1 и ГО ИМКЭС совпадает. И наоборот, вторичный максимум и минимум градиента потенциала, которые наблюдаются во время интенсивного прогрева подстилающей поверхности и приземного воздуха ($\sim 08.00-12.00$), в ПН-1 проявляются сильнее, чем в ПН-2 и ПН-3. Во всех пунктах наблюдений перед рассветом отмечается дополнительный максимум $\nabla\varphi$, однако в ПН-1 он запаздывает относительно ПН-2 и ПН-3 на 1 и 2 ч соответственно. Кроме того, в послеполуночные часы ($13.00-16.00$) в ПН-1 зарегистрирован дополнительный минимум $\nabla\varphi$, который не отмечается в экспедиционных пунктах наблюдениях и ГО ИМКЭС. Основной причиной отмеченных отличий суточного хода градиента потенциала в ПН-1 от аналогичного суточного хода в ПН-2 и ПН-3 является расположение первого в узкой горной долине. Вогнутый рельеф определяет укороченный период солнечного сияния, замедленный прогрев в утренние часы и, следовательно, более слабое перемешивание воздуха в ПН-1. Кроме того, в ПН-1 ярко проявляется местная (горно-долинная) циркуляция, под влиянием которой вечером, ночью и утром доминируют южные направления ветра, а в дневное время – западные (рис. 8). Последнее, в свою очередь, влияет на изменение концентрации аэрозольных частиц и аэроионов в воздухе. Исходя из отмеченного выше, можно сделать вывод о том, что суточные вариации приземного электрического поля в узких горных долинах (ущельях) сильно отличаются от аналогичных вариаций в других формах горного рельефа, что, главным образом, обусловлено закрытостью горизонта.

Суточная изменчивость концентрации аэроионов. На основе проведенных измерений (с вре-

менным разрешением 1 с) концентраций положительных и отрицательных аэроионов в ПН были рассчитаны средние их значения для каждого часа в течение суток (рис. 9, 10). В ПН в дневное время (после полудня), как правило, наблюдаются пониженные значения концентрации аэроионов обеих полярностей, а ночью и утром – повышенные. Полученный результат хорошо согласуется с результатами подобных исследований других авторов [Retalis, 1983; Arshinov et al., 2022]. При этом суточный ход n_{\pm} в ПН находится в противофазе ходу $\nabla\varphi$, что объясняется их обратной связью.

Дневной минимум n_{\pm} связан с прогревом подстилающей поверхности, который способствует развитию неустойчивой стратификации атмосферы и приводит к развитию конвективных процессов и турбулентности. Конвекция и турбулентность, в свою очередь, перемешивают дочерние продукты распада радона и аэрозоль в воздухе, приводя к снижению интенсивности ионообразования в приземном слое, усилению стока образовавшихся аэроионов на аэрозоль, а также выносу ионов в вышележащие слои атмосферы (в особенности отрицательных). Ночной/утренний максимум, наоборот, обусловлен ослаблением (прекращением) конвективных и турбулентных движений и преимущественно устойчивой стратификацией в атмосфере, приводящих к осаждению аэрозольных частиц и повышению концентрации дочерних продуктов распада радона в приземном слое. Кроме факторов, описанных выше, значительное влияние на суточный ход n_{\pm} оказывают физико-географические условия в ПН. Наиболее простой суточный ход концентрации положительных аэроионов отмечен в ПН-2, расположенном в обширной котловине с большой высотой над уровнем моря (более 1900 м), на удалении от горных хребтов и водных объектов, на участке с плоской каменистой поверхностью и полупустынным ландшафтом. Для этого пункта характерен суточный ход, n_{\pm} имеет вид простой волны с утренним максимумом (в период рассвета) и послеполуночным/вечерним минимумом (рис. 9, 10).

Более сложный ход n_{\pm} был отмечен в ПН-3 (рис. 9, 10). В данном пункте на фоне общего возрастания концентрации n_{\pm} в ночные и утренние часы отмечаются дополнительные максимумы (в ~ 23.00 , $01.00-02.00$ и $07.00-08.00$ местного времени) и минимумы (в ~ 00.00 и $04.00-06.00$). Периоды времени, в которые отмечаются максимумы n_{\pm} , в целом соответствуют периодам времени минимумов $\nabla\varphi$ и наоборот.

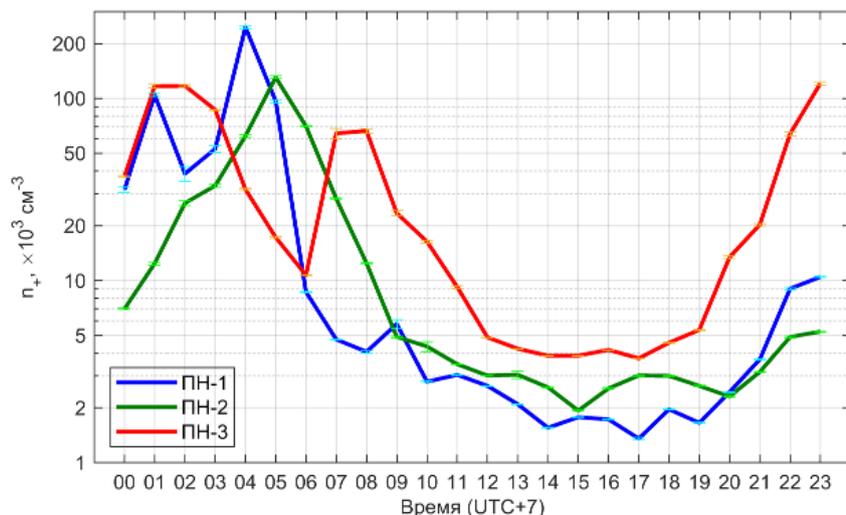


Рис. 9. Суточные вариации среднечасовых значений n_+ ионов в ПН

Fig. 9. Diurnal variation in hourly means of n_+ at observation sites

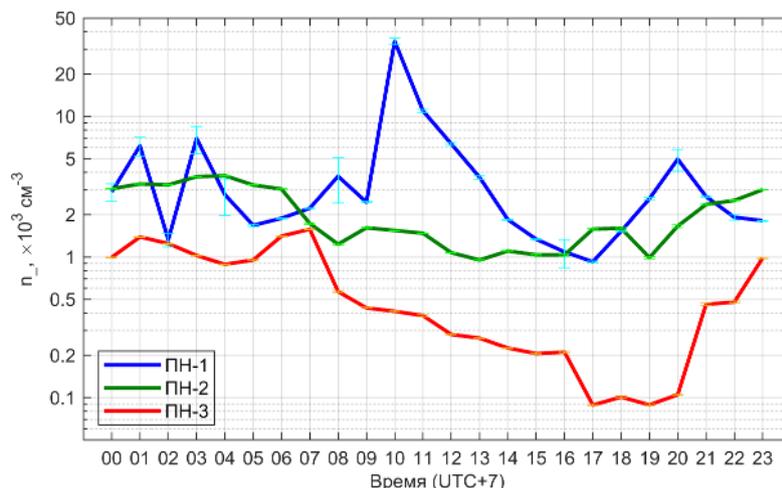


Рис. 10. Суточные вариации среднечасовых значений n_- в ПН

Fig. 10. Diurnal variation in hourly means of n_- at observation sites

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что зарегистрированная динамика n_{\pm} обусловлена естественными причинами и не связана с инструментальными ошибками измерений аэроионов в период повышенной влажности воздуха во время рассвета. Помимо механизмов, описанных выше, дополнительное влияние на динамику n_{\pm} в ПН-3, по-видимому, также оказывает бризовая циркуляция, выражающаяся в циклическом изменении направления и скорости ветра (см. рис. 8). Так, в ~21.00–07.00 местного времени в условиях «хорошей погоды» в пункте отмечаются южные направления ветра, а в ~08.00–20.00 – западные. При этом ПН-3 расположен в относительной близости от оз. Хиндиктик-Холь (в ~2 км к западу) и более мелких озёр и заболоченной территории у подножия массива Монгун-Тайга (в ~3–5 км к югу и юго-

востоку). Известно, что над обводнёнными территориями (водными объектами) затруднен выход (эманация) радона [Смирнов, 1992; Szegvary et al., 2007]. Как следствие, переносимые от них объёмы воздуха будут иметь пониженное содержание дочерних продуктов распада радона. Периодам времени с минимумами n_{\pm} в ПН-3 в целом соответствуют направлениям ветра от озёр и болот. Наиболее ярко эта связь проявляется в динамике n_- в вечернее время, когда минимальным значениям этой величины соответствует наиболее сильный ветер (~6 м/с), дующий от оз. Хиндиктик-Холь.

Наиболее сложный суточный ход n_{\pm} (см. рис. 9, 10), так же как суточный ход $\nabla\varphi$, отмечается в ПН-1, расположенном в горной долине. В этом пункте в динамике n_{\pm} в ночные и ранние утренние часы также отмечаются

максимумы и минимумы n_{\pm} , подобные зарегистрированным в ПН-3, однако время их наступления значительно отличается. Кроме того, в период интенсивного прогрева подстилающей поверхности и приземного слоя (~10.00–12.00 местного времени) и перед закатом (~19.00–21.00) в динамике n_{\pm} отмечаются дополнительные ярко выраженные максимумы. Объяснением сложной динамики аэроионов в ПН-1, предположительно, является влияние на неё горно-долинной циркуляции. Схожий эффект влияния кататического ветра (стоковые ветры, горно-долинная циркуляция) на повышение концентраций положительных ионов были обнаружены в [Kamra et al., 2015; Nepolian, 2021]. Так, в ~22.00–11.00 отмечаются южные направления ветра, а в ~12.00–21.00 – западные (см. рис. 8).

Суточная изменчивость характеристик ветра, в свою очередь, обуславливает изменчивость содержания в воздухе аэрозольных частиц и дочерних продуктов распада радона, выделяющегося из почвогрунтов. Кроме того, как было показано выше, вблизи ПН-1 расположена горная река, являющаяся дополнительным источником ионизации, и активный тектонический разлом, где происходит интенсивное поступление в воздух радона и его производных.

При соответствующих направлениях ветра должно происходить возрастание концентрации аэроионов в пункте вследствие их переноса от источника ионизации или ионизации воздуха непосредственно в пункте принесёнными дочерними продуктами распада радона соответственно. Так, дополнительные максимумы n_{\pm} в околополуденные и вечерние часы, о которых говорилось выше, соответствуют периодам смены направления ветра с южного на западное, и наоборот.

Таким образом, в целом для территории Горного Алтая (на примере ПН) характерна повышенная концентрация аэроионов в ночное/утреннее время и пониженная – в дневное/вечернее. Однако значительное влияние на суточную изменчивость n_{\pm} оказывают физико-географические условия районов наблюдений, в особенности рельеф и близость водных объектов. Наиболее сложный суточный n_{\pm} отмечен в горной долине.

Заключение

Представлен анализ данных экспедиционных измерений градиента потенциала электрического поля,

концентраций положительных и отрицательных аэроионов, а также основных метеорологических величин, характеристик солнечного излучения и содержания аэрозоля в воздухе на территории Горного Алтая в июле 2022–2023 гг.

Получены оценки средних значений и типичной изменчивости величин как в целом за периоды наблюдений, так и в течение суток в трёх пунктах наблюдений, расположенных в разных формах рельефа и на различных высотах над уровнем моря. Выделены основные факторы, влияющие на изменчивость атмосферно-электрических величин в электрически невозмущённых атмосферных условиях (условия «хорошей погоды») в горно-степных ландшафтах.

Было установлено:

1. При увеличении абсолютной высоты местности происходит возрастание средних значений градиента потенциала в электрически невозмущённых атмосферных условиях (условия «хорошей погоды»), обусловленное различием характеристик атмосферы и кривизной поверхности в пунктах наблюдений.

2. Концентрация положительных аэроионов при увеличении высоты местности над уровнем моря также увеличивается с $3,6 \text{ см}^{-3}$ в долине реки до $6,5 \text{ см}^{-3}$ на высокогорном плато, и наоборот, концентрация отрицательных уменьшается с $1,8$ до $0,3 \text{ см}^{-3}$ соответственно. Рост концентрации положительных аэроионов с высотой, предположительно, обусловлен усилением ионизации приземного воздуха потоком галактических космических лучей и уменьшением концентрации аэрозоля.

3. Уменьшение концентрации отрицательных аэроионов зависит от формы рельефа, влияющей на интенсивность выноса и перемешивания аэроионов, и отсутствием дополнительных локальных источников ионизации.

4. Осреднённый суточный ход градиента потенциала электрического поля в пунктах наблюдений, расположенных в котловине и на плато, хорошо согласуется между собой (коэффициент корреляции $0,67$) и с унитарной вариацией, в то время как в пункте наблюдения в горной долине сильно отличается от других пунктов из-за сильного влияния на него локальных факторов.

5. Наиболее сложный суточный ход концентраций аэроионов, в особенности отрицательных, также характерен для горной (речной) долины, а наиболее простой – для засушливой котловины.

Список источников

- Зайнетдинов Б.Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2018. Вып. 588. С. 47–61.
- Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л. : Гидрометеиздат, 1972. 323 с.
- Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог : Таганрогский радиотехнический университет, 1998. 123 с.
- Севостьянов В.А., Грязькин А.В. Оценка аэроионной способности древесных растений для создания локальных фитологических ингаляторов // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. 82–86.

- Смирнов В.В.** Ионизация в тропосфере. СПб. : Гидрометеиздат, 1992. 309 с.
- Торопов А.А., Козлов В.И., Каримов Р.Р.** Вариации атмосферного электрического поля по наблюдениям в Якутске // Наука и образование. 2016. № 2 (82). С. 58–65.
- Adzhiev A.K., Kupovykh G.V.** Measurements of the atmospheric electric field under high-mountain conditions in the vicinity of Mt. Elbrus // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. V. 51. P. 633–638.
- Adzhiev A.Kh., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V.** Diurnal variations of the electric field in the atmospheric boundary layer // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. P. 397–405.
- Afreen S., Victor N.J., Bashir G., Chandra S., Ahmed N., Siingh D., Singh R.P.** First observation of atmospheric electric field at Kashmir valley North Western Himalayas, Srinagar (India) // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2020. V. 211. P. 105481.
- Ahmad N., Gurmani S.F., Basit A., Shah M.A., Iqbal T.** Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient // *Advances in Space Research*. 2021. V. 67. P. 2491–2503.
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Shikhova N.M., Afinogenov K.V.** Electricity of the convective atmospheric boundary layer: field observations and numerical simulation // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. P. 390–398.
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Mareev E.A.** Electrodynamical properties and height of atmospheric convective boundary layer // *Atmos. Res.* 2017. V. 194. P. 119–129.
- Arshinov M., Belan B., Garmash O., Davydov D.K., Demakova A., Ezhova E., Kozlov A., Kulmala M., Lappalainen H., Petäjä T.** Correlation between the concentrations of atmospheric ions and radon as judged from measurements at the Fonovaya Observatory // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022. V. 35 (1). P. 36–42. doi: 10.15372/AOO20220102.
- Baishev D.G., Samsonov S.N., Moiseev A.V., Boroev R.N., Stepanov A.E., Kozlov V.I., Korsakov A.A., Toropov A.A., Yoshikawa A., Yumoto K.** Monitoring and investigating space weather effects with meridional chain of instruments in Yakutia: a brief overview // *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. V. 3 (2). P. 25–33.
- Bennett A.J., Harrison R.G.** Variability in surface atmospheric electric field measurements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. V. 142. P. 012046.
- Blanchard D.C.** Positive space charge from the sea // *J. Aerosol Sci.* 1966. V. 23. P. 507–515.
- Chalmers J.A.** Negative electric fields in mist and fog // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1952. V. 2. P.155–159.
- Chalmers J.A.** Atmospheric electricity. Oxford: Pergamon Press, 1967. 515 p.
- Firstov P.P., Malkin E.I., Akbashev R.R., Druzhin G.I., Cherneva N.V., Holzworth R.H., Uvarov V.N., Stasiy I.E.** Registration of atmospheric-electric effects from volcanic clouds on the Kamchatka peninsula (Russia) // *Atmosphere*. 2020. V. 11. P. 634.
- Harrison R.G., Tammet H.** Ions in the terrestrial atmosphere and other solar system atmospheres // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. P. 107–118. doi: 10.1007/s11214-008-9356-x.
- Harrison R.G.** The Carnegie Curve. *Surveys in geophysics*. 2013. V. 34. P. 209–232.
- 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 (2). P. 767–798. doi: 10.5194/acp-11-767-2011.
- Israël H.** Atmospheric electricity // Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1970. 317 p.
- Israël H.** Atmospheric electricity. Vol. 2: Fields, Charges, Currents. Jerusalem : Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
- Jayarathne E.R., Ling X., Morawska L.** Role of vegetation in enhancing radon concentration and ion production in the atmosphere // *Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 45 (15). P. 6350–6355. doi: 10.1021/es201152g.
- Kamra A.K., Siingh D., Gautam A.S., Kanawade V.P., Tripathi S.N., Srivastava A.K.** Atmospheric ions and new particle formation events at a tropical location, Pune, India // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. V. 141 (693). P. 3140–3156. doi: 10.1002/qj.2598.
- Laakso L., Hirsikko A., Groenholm T., Kulmala M., Luts A., Parts T.-E.** Waterfalls as sources of small charged aerosol particles // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 2271–2275. doi: 10.5194/acp-7-2271-2007.
- Nicoll K., Harrison R., Barta V., Bor J., Brugge R., Chillingarian A., Chum J., Georgoulas A., Guha A., Kourtidis K., Kubicki M., Mareev E., Matthews J., Mkrtchyan H., Odzimek A., Raulin J.-P., Robert D., Silva H.G., Tacza J., Yairn Y., Yaniv R.** A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 184. P. 18–29.
- Tacza J., Raulin J.-P., Morales C., Macotela E., Marun A., Fernandez G.** Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes // *Atmospheric Research*. 2021. V. 248. P. 105200.
- Nepolian J.V., Siingh D., Singh R.P., Gautam A., Gautam S.** Analysis of positive and negative atmospheric air ions during new particle formation (NPF) events over urban city of India // *Aerosol Science and Engineering*. 2021. V. 5. P. 460–477. doi: 10.1007/s41810-021-00115-4
- Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina I.N.** Profiles of polar conductivities and radon-222 concentration in the atmosphere by stable and labile stratification of surface layer // *Atmos. Res.* 2009. V. 91. P. 206–214.
- Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M., Oglezneva M.V., Smirnov S.V.** The electric field of the undisturbed atmosphere in the South of Western Siberia: A case study on Tomsk // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 614.
- Retalis D.A.** Study of large ions concentration in the air above Athens. // *Arch. Met. Geoph. Biocl. A*. 1983. V. 32. P. 135–143. doi: 10.1007/BF02272718
- Rycroft M.J., Harrison R.G., Nicoll K.A., Mareev E.A.** An overview of Earth's Global Electric Circuit and atmospheric conductivity // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. P. 83–105. doi: 10.1007/s11214-008-9368-6
- Smirnov S.** Atmospheric electricity measurements in the Pacific Northwest, Russia // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. P. 2571.
- Szegvary T., Conen F., Stöhlker U., Dubois G., Bosse P., de Vries G.** Mapping terrestrial γ -dose rate in Europe based on routine monitoring data // *Radiat. Meas.* 2007. V. 42. P. 1561–1572.
- Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh.** Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // *Atmospheric Research*. 2016. V. 172–173. P. 119–125.

References

- Zainetdinov B.G. *Rezultaty nablyudeniya za elektricheskimi kharakteristikami prizemnogo sloya atmosfery v polyarnom regione* [Results of observations of the electrical characteristics of the surface layer of the atmosphere in the polar region] // Proceedings of the Voeikov Main geophysical Observatory. 2018. No. 588. pp. 47–61. In Russian
- Krasnogorskaya N.V. *Elektrichestvo nizhnikh sloyev atmosfery i metody yego izmereniya* [Electricity of the Lower Layers of the Atmosphere and Methods of Its Measurement]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 323 p. In Russian
- Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Y.M. *Teoriya elektrodnoogo effekta v atmosfere* [Theory of the Electrode Effect in the Atmosphere]. Taganrog: Taganrog Radiotechnical University, 1998. 124 p. In Russian
- Sevostyanov V.A., Gryazkin A.V. *Otsenka aeroionnoy sposobnosti drevesnykh rasteniy dlya sozdaniya lokal'nykh fitologicheskikh ingyalyatoriyev* [Assessment of aero ionic ability of wood plants for creation local phytological inhalatoriums] // Advances in current natural sciences. 2016. № 9. pp. 82–86. In Russian
- Smirnov V.V. *Ionizatsiya v troposfere* [Ionization in the troposphere]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 309 p. In Russian
- Toropov A.A., Kozlov V.I., Karimov R.R. *Variatsii atmosfernogo elektricheskogo polya po nablyudeniya v Yakutske* [Variations of the atmospheric electric field by observations in Yakutsk] // Nauka i obrazovaniye. 2016. No. 2 (82). pp. 58–65. In Russian
- Adzhiev A.K., Kupovykh G.V. Measurements of the atmospheric electric field under high-mountain conditions in the vicinity of Mt. Elbrus. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. V. 51. pp. 633–638.
- Adzhiev A.Kh., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Diurnal variations of the electric field in the atmospheric boundary layer // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. pp. 397–405.
- Afreen S., Victor N.J., Bashir G., Chandra S., Ahmed N., Siingh D., Singh R.P. First observation of atmospheric electric field at Kashmir valley North Western Himalayas, Srinagar (India) // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys*. 2020. V. 211. pp. 105481.
- Ahmad N., Gurmani S.F., Basit A., Shah M.A., Iqbal T. Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient // *Advances in Space Research*. 2021. V. 67. pp. 2491–2503.
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Shikhova N.M., Afinogenov K.V. Electricity of the convective atmospheric boundary layer: field observations and numerical simulation. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. pp. 390–398.
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Mareev E.A. Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer // *Atmos. Res*. 2017. V. 194. pp. 119–129.
- Arshinov M., Belan B., Garmash O., Davydov D.K., Demakova A., Ezhova E., Kozlov A., Kulmala M., Lappalainen H., Petäjä T. Correlation between the concentrations of atmospheric ions and radon as judged from measurements at the Fonovaya Observatory // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022. V. 35 (1). pp. 36–42. doi: 10.15372/AOO20220102.
- Baishev D.G., Samsonov S.N., Moiseev A.V., Boroev R.N., Stepanov A.E., Kozlov V.I., Korsakov A.A., Toropov A.A., Yoshikawa A., Yumoto K. Monitoring and investigating space weather effects with meridional chain of instruments in Yakutia: a brief overview // *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. V. 3 (2). pp. 25–33.
- Bennett A.J., Harrison R.G. Variability in surface atmospheric electric field measurements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. V. 142. pp. 012046.
- Blanchard D.C. Positive space charge from the sea // *J. Aerosol Sci*. 1966. V. 23. pp. 507–515.
- Chalmers J.A. Negative electric fields in mist and fog // *J. Atmos. Terr. Phys*. 1952. V. 2. pp. 155–159.
- Chalmers J.A. *Atmospheric electricity*. Oxford: Pergamon Press, 1967. 515 p.
- Firstov P.P., Malkin E.I., Akbashev R.R., Druzhin G.I., Cherneva N.V., Holzworth R.H., Uvarov V.N., Stasiy I.E. Registration of atmospheric-electric effects from volcanic clouds on the Kamchatka peninsula (Russia) // *Atmosphere*. 2020. V. 11. pp. 634.
- Harrison R.G., Tammet H. Ions in the terrestrial atmosphere and other solar system atmospheres // *Space Sci. Rev*. 2008. V. 137. pp. 107–118. doi: 10.1007/s11214-008-9356-x.
- Harrison R.G. The Carnegie Curve. *Surveys in geophysics*. 2013. V. 34. pp. 209–232.
- 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(2). pp. 767–798. doi:10.5194/acp-11-767-2011.
- Israël H. *Atmospheric electricity* // Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1970. 317 p.
- Israël H. *Atmospheric electricity*. Vol. 2: Fields, Charges, Currents. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
- Jayarathne E.R., Ling X., Morawska L. Role of vegetation in enhancing radon concentration and ion production in the atmosphere // *Environ. Sci. Technol*. 2011. V. 45 (15). pp. 6350–6355. doi: 10.1021/es201152g.
- Kamra A.K., Siingh D., Gautam A.S., Kanawade V.P., Tripathi S.N., Srivastava A.K. Atmospheric ions and new particle formation events at a tropical location, Pune, India. *Q. J. R. Meteorol.Soc*. 2015. V. 141 (693). pp. 3140–3156. doi:10.1002/qj.2598.
- Laakso L., Hirsikko A., Groenholt T., Kulmala M., Luts A., Parts T.-E. Waterfalls as sources of small charged aerosol particles // *Atmos. Chem. Phys*. 2007. V. 7. pp. 2271–2275. doi: 10.5194/acp-7-2271-2007.
- Nicoll K., Harrison R., Barta V., Bor J., Brugge R., Chillingarian A., Chum J., Georgoulas A., Guha A., Kourtidis K., Kubicki M., Mareev E., Matthews J., Mkrtchyan H., Odzimek A., Raulin J.-P., Robert D., Silva H.G., Tacza J., Yairm Y., Yaniv R. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 184. pp. 18–29.
- Tacza J., Raulin J.-P., Morales C., Macotela E., Marun A., Fernandez G. Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes. *Atmospheric Research*. 2021. V. 248. pp. 105200.
- Nepolian J.V., Siingh D., Singh R.P., Gautam A., Gautam S. Analysis of positive and negative atmospheric air ions during new particle formation (NPF) events over urban city of India // *Aerosol Science and Engineering*. 2021. V. 5. pp. 460–477. doi:10.1007/s41810-021-00115-4.
- Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina I.N. Profiles of polar conductivities and radon-222 concentration in the atmosphere by stable and labile stratification of surface layer // *Atmos. Res*. 2009. V. 91. pp. 206–214.
- Pustovalov K.N., Nazorskiy P.M., Oglezneva M.V., Smirnov S.V. The electric field of the undisturbed atmosphere in the South of Western Siberia: A case study on Tomsk // *Atmosphere*. 2022. V. 13. pp. 614.

Retalis D.A. Study of large ions concentration in the air above Athens. // Arch. Met. Geoph. Biocl. A. 1983. V. 32. pp. 135–143. doi: 10.1007/BF02272718.

Rycroft M.J., Harrison R.G., Nicoll K.A., Mareev E.A. An overview of Earth's Global Electric Circuit and atmospheric conductivity // Space Sci. Rev. 2008. V. 137. P. 83–105. doi: 10.1007/s11214-008-9368-6.

Smirnov S. Atmospheric electricity measurements in the Pacific Northwest, Russia // Applied Sciences. 2023. V. 13. pp. 2571.

Szegvary T., Conen F., Stöhlker U., Dubois G., Bosse, P., de Vries G. Mapping terrestrial γ -dose rate in Europe based on routine monitoring data // Radiat. Meas. 2007. V. 42, pp. 1561–1572.

Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel. Atmospheric Research. 2016. V. 172–173. pp. 119–125.

Информация об авторах:

Пустовалов К.Н., кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: const.pv@yandex.ru

Нагорский П.М., доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: npm_sta@mail.ru

Оглезнева М.В., младший научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: oglezneva.m@yandex.ru

Сат А.А., младший научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: artysh.sat@gmail.com

Смирнов С.В., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: smirnov@imces.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Pustovalov K.N., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia; Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: const.pv@yandex.ru

Nagorskiy P.M., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: npm_sta@mail.ru

Oglezneva M.V., Junior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: oglezneva.m@yandex.ru

Sat A.A., Junior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: artysh.sat@gmail.com

Smirnov S.V., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia; Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: smirnov@imces.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.08.2024; одобрена после рецензирования 15.01.2025; принята к публикации 30.10.2025

The article was submitted 31.08.2024; approved after reviewing 15.01.2025; accepted for publication 30.10.2025