

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 234—250.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):234—250.

Научная статья
УДК [551.594:911.5](571)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-234-250

**Сравнительный анализ
изменчивости невозмущённого электрического поля
в горных и степных ландшафтах на юге Сибири
по данным экспедиционных измерений**

**Константин Николаевич Пустовалов^{1, 2},
Пётр Михайлович Нагорский¹, Мария Викторовна Оглезнева¹,
Артыш Алашович Сат¹, Сергей Васильевич Смирнов^{1, 2}**

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия, const.pv@yandex.ru

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Аннотация. По данным экспедиционных измерений на юге Сибири (Хакасия, Тыва, Бурятия, Республика Алтай и Алтайский край) проведён анализ изменчивости электрического поля в приземном слое в электрически невозмущённых атмосферных условиях (условия «хорошей погоды»). Полученные оценки показали увеличение средних значений градиента потенциала при повышении абсолютной высоты местности, а также влияние на них форм рельефа и локальных условий окружающей среды. Проведён сравнительный анализ изменчивости градиента потенциала электрического поля в степных и горных ландшафтах в целом за весь период, а также его суточных вариаций. Отмечена высокая корреляция суточной изменчивости градиента потенциала в различных частях Южной Сибири. Выделены два вида суточного хода градиента потенциала на территории исследования.

Ключевые слова: атмосферное электричество, атмосферное электрическое поле, градиент потенциала, условия «хорошей погоды», кривая Карнеги, Сибирь.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН, проект FWRG-2021-0001 (номер госрегистрации 121031300154-1).

Для цитирования: Пустовалов К. Н., Нагорский П. М., Оглезнева М. В., Сат А. А., Смирнов С. В. Сравнительный анализ изменчивости невозмущённого электрического поля в горных и степных ландшафтах на юге Сибири по данным экспедиционных измерений // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 234—250. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-234-250.

Original article

Variability of the undisturbed electric field and the factors influencing it in mountain and steppe landscapes in southern Siberia based on the expedition study

*Konstantin N. Pustovalov^{1,2}, Petr M. Nagorskiy¹,
Mariya V. Oglezneva¹, Artysh A. Sat¹,
Sergei V. Smirnov^{1,2}*

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of SB RAS, Tomsk, Russia, const.pv@yandex.ru

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Summary. To study the functioning of the GEC, monitoring and analysis of the variability of atmospheric-electrical quantities in different regions of the Earth is necessary. The organization of regular observation points in the Asian part of Russia is complicated by their inaccessibility. Unfortunately, due to the rare observation network, the variability of atmospheric-electrical quantities in this region remains insufficiently studied today. In this regard, expeditionary observations remain the main way to study them. Instrumental measurements of potential gradient were carried out at different altitude above sea level and on different forms of landscapes. For measurements at each of the observation sites, open homogeneous areas with a landscape characteristic of the area, not subject to anthropogenic impact, were selected. Observations at each site ranged from 2 to 9 days. Potential gradient was measured using a portable electric field mill EFS-2/50 (NTCR, Russia). The field mill was preliminarily calibrated using a calibration stand (plate capacitor) and brought to the readings of electric field mill CS110 (Campbell Scientific, USA) operating in the monitoring mode at the geophysical observatory of IMCES SB RAS. Also, we measured main meteorological quantities, and monitored cloud cover and atmospheric phenomena. As a result, the main statistical characteristics of potential gradient variability at observation points under conditions of an electrically undisturbed atmosphere were obtained. At expedition observation points, the main potential gradient maximum is observed after noon (01—05 PM), and the main minimum is observed after midnight (00—02 AM). In addition, in the pre-dawn hours (03—04 AM) and during dawn (05—07 AM) secondary maximums and minimums are observed, respectively. There is good agreement in the diurnal cycle of potential gradient in electrically undisturbed atmospheric conditions at expedition observation points 2, 4, 5, 6, 8 and 10 (correlation coefficient is 0,5–0,9). It is noted that with an increase in the absolute height of the terrain, there is an increase in the average (median) potential gradient values. This dependence is clearly evident both on the territory of the Republic of Tyva, the Republic of Buryatia, as well as the Republic of Altai and Altai Krai. Also, the shape of the terrain can influence on potential gradient values. There is an excess of potential gradient on convex forms of terrain, and its decrease near base of convex forms and on concave forms of terrain compared to a flat surface. Finally, we can note another important factor that influences the potential gradient in electrically undisturbed atmospheric conditions — local environmental conditions (air humidity, aerosol, background radiation and other factors).

Keywords: atmospheric electricity, atmospheric electric field, potential gradient, fair-weather condition, Carnegie curve, Siberia.

Acknowledgments: This research is supported by the Russian Science Foundation (Russia), project No.22-27-00482, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>.

For citation: Pustovalov K., Nagorskiy P., Oglezneva M., Sat A., Smirnov S. Variability of the undisturbed electric field and the factors influencing it in mountain and steppe landscapes in southern Siberia based on the expedition study. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):234—250. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-234-250.

Введение

Измерения основных атмосферно-электрических величин в приземном слое дают информацию как о состоянии и изменчивости атмосферного электрического поля *in situ*, так и о функционировании всей глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1—3]. Средняя суточная вариация электрического поля (унитарная вариация), которая соответствует универсальному времени и не зависит от места измерения, представляет собой глобальный ежедневный вклад электрической активности в районах нарушенной погоды [4]. При этом вклад региональных и локальных факторов может существенно влиять на изменчивость атмосферно-электрических величин [5—10]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно меняться из-за различных природных и антропогенных факторов, то для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости атмосферно-электрических величин в различных регионах Земли [11].

Изменчивость атмосферно-электрических величин в азиатской части России на сегодняшний день остаётся слабо изученной. На огромной территории Сибири и Дальнего Востока регулярные наблюдения за параметрами атмосферного электричества проводятся всего в 5 пунктах сети Росгидромет (г. Иркутск, г. Южно-Сахалинск, г. Диксон, г. Тикси и ст. Мыс Баранова) [12] и нескольких пунктах наблюдений НИИ РАН (г. Томск [13]; г. Якутск, г. Нерюнгри, г. Тикси, полигон Ойбенкель [14, 15]; с. Паратунка [16]). При этом пункты наблюдений расположены главным образом на равнинных территориях и побережьях морей. Кроме того, большинство из них находится вблизи населённых пунктов, влияние которых неизбежно сказывается на измеряемых величинах. Эпизодические наблюдения за атмосферным электрическим полем также проводятся ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» для наблюдений за вулканами [17].

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.

Целью данной работы является оценка средних значений и типичной изменчивости атмосферного электрического поля в условиях «хорошей погоды» на типичных ландшафтах Южной Сибири по данным экспедиционных измерений, а также их сравнительный анализ.

Исходные материалы и методика исследований

Исследование основано на данных измерений градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi = d\varphi/dz = -E_z$, где φ и E_z — потенциал и вертикальная компонента напряжённости электрического поля) в пунктах измерений в Южной Сибири. Экспедиционные работы проводились в июле—августе 2020 г., 2022 г. и 2023 г. в 10 пунктах наблюдений (ПН), расположенных на разных высотах и в различных

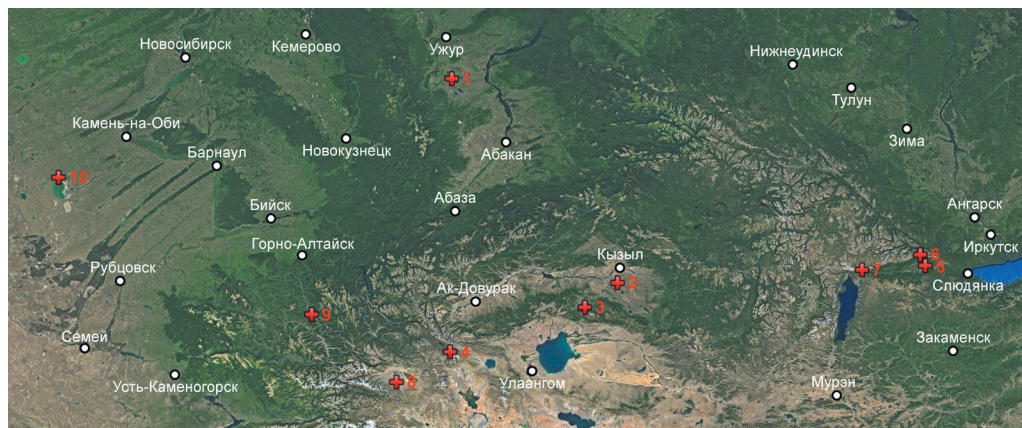


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений, представленных в табл. 1.

Fig. 1. Location of the observation sites presented in table. 1.

формах рельефа и ландшафтах (рис. 1, табл. 1) на территории Бурятии, Хакасии, Алтая и Тывы.

Таблица 1

Описание пунктов наблюдений
Description of observation sites

№ ПН	Район наблюдений	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.	Абсолютная высота, м	Периоды наблюдений
1	Урочище Красная Сопка (Хакасия)	54,69	90,00	540	11–14.08.2022 г.
2	Урочище Шоль (Тыва)	51,49	94,40	910	1–6.08.2022 г.
3	Урочище Баян-Тала (Тыва)	51,09	93,53	1030	19–22.07.2022 г.
4	Массив Монгун-Тайга (Тыва)	50,35	89,95	2490	24–29.07.2022 г.
5	Тункинская котловина (Бурятия)	51,77	102,58	770	17–18.08.2020 г.
6	Тункинские гольцы (Бурятия)	51,95	102,44	1440	12–13.08.2020 г.
7	Мондинская котловина (Бурятия)	51,70	100,87	1380	10–11.08.2020 г.
8	Чуйская котловина (Респ. Алтай)	49,84	88,54	1930	9–16.07.2023 г.
9	Долина Катунь (Респ. Алтай)	50,98	86,27	550	18–23.07.2023 г.
10	Кулундинская равнина (Алтайский край)	53,17	79,55	130	12–20.08.2023 г.

ПН-1 (табл. 1) был размещен в урочище Красная сопка в Июско-Ширинской степи на водоразделе озёр Белё и Тус (Республика Хакасия, Ширинский район). ПН-2 находился в урочище Шоль в центре Центрально-Тувинской котловины (Республика Тыва, Тандинский кожуун), представленном полупустынным ландшафтом. ПН-3 был размещён в урочище Баян-Тала — степи, вблизи северного склона хр. Восточный Танну-Ола (Республика Тыва, Чеди-Хольский кожуун).

ПН-4 располагался на высокогорном плато, представленном горной тундрой и альпийскими лугами, вблизи горного массива Монгун-Тайга и оз. Хиндиктиг-Холь (Республика Тыва, Монгун-Тайгинский кожуун). ПН-5—ПН-7 были установлены в юго-западной части Байкальской рифтовой зоны (Республика Бурятия, Тункинский район), которая представляет собой серию котловин (с запада на восток: Мондинская, Хойтогольская, Туранская, Тункинская, Торская, Быстринская котловины), ограниченную с юга и севера хребтами Хамар-Дабан и Тункинские гольцы, соответственно. При этом ПН-5 находился в центральной части Тункинской котловины, ПН-6 — на отроге хребта Тункинские гольцы (южный склон), а ПН-7 — в западной части Мондинской котловины в верхнем течении р. Иркут. Местонахождение ПН-8 было определено центральной частью Чуйской котловины, представляющей собой полупустыню (Республика Алтай, Кош-Агачский район). ПН-9 находился на террасе на правом берегу р. Катунь в центре узкой V-образной горной долины (Республика Алтай, Чемальский район). ПН-10 располагался на нативном участке сухой степи Кулундинской равнины к северу от оз. Кулунда.

Экспедиционные работы в описанных выше пунктах проводились главным образом в антициклонических условиях, с которыми была связана ясная или малооблачная погода. Длительность измерений градиента потенциала электрического поля в каждом пункте определялась погодными условиями и составила от 2 до 9 суток (табл. 1).

Для проведения экспедиционных работ в каждом из пунктов выбирались открытые однородные участки, репрезентативные для значительной территории и мало подверженные антропогенному влиянию. Для регистрации $\nabla\phi$ использовался портативный флюксметр EFS-2/50 (ООО «НТЦР»), установленный на заземлённом штативе-треноге на высоте 2 м. Данный флюксметр был предварительно откалиброван с помощью калибровочного стенда (плоского конденсатора) и приведён к показаниям флюксметра CS110 (Campbell Scientific), работающего в режиме мониторинга в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН [13]. Регистрация $\nabla\phi$ выполнялась с временным разрешением 1 с. Расположение флюксметра в ПН представлено на рис. 2.

Кроме измерения $\nabla\phi$ в каждом из пунктов также производились параллельные измерения основных метеорологических величин и энергетической освещённости в УФ- и видимой областях с временным разрешением 1 мин, а также наблюдения за облачностью и атмосферными явлениями. В некоторых пунктах дополнительно измерялись характеристики естественного радиационного фона и содержания аэрозольных частиц ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) в воздухе. В данной статье изменчивость этих величин рассматриваться не будет, так как это не входило в цель описываемого исследования.

Анализ экспериментальных данных заключался в проведении дескриптивно-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.

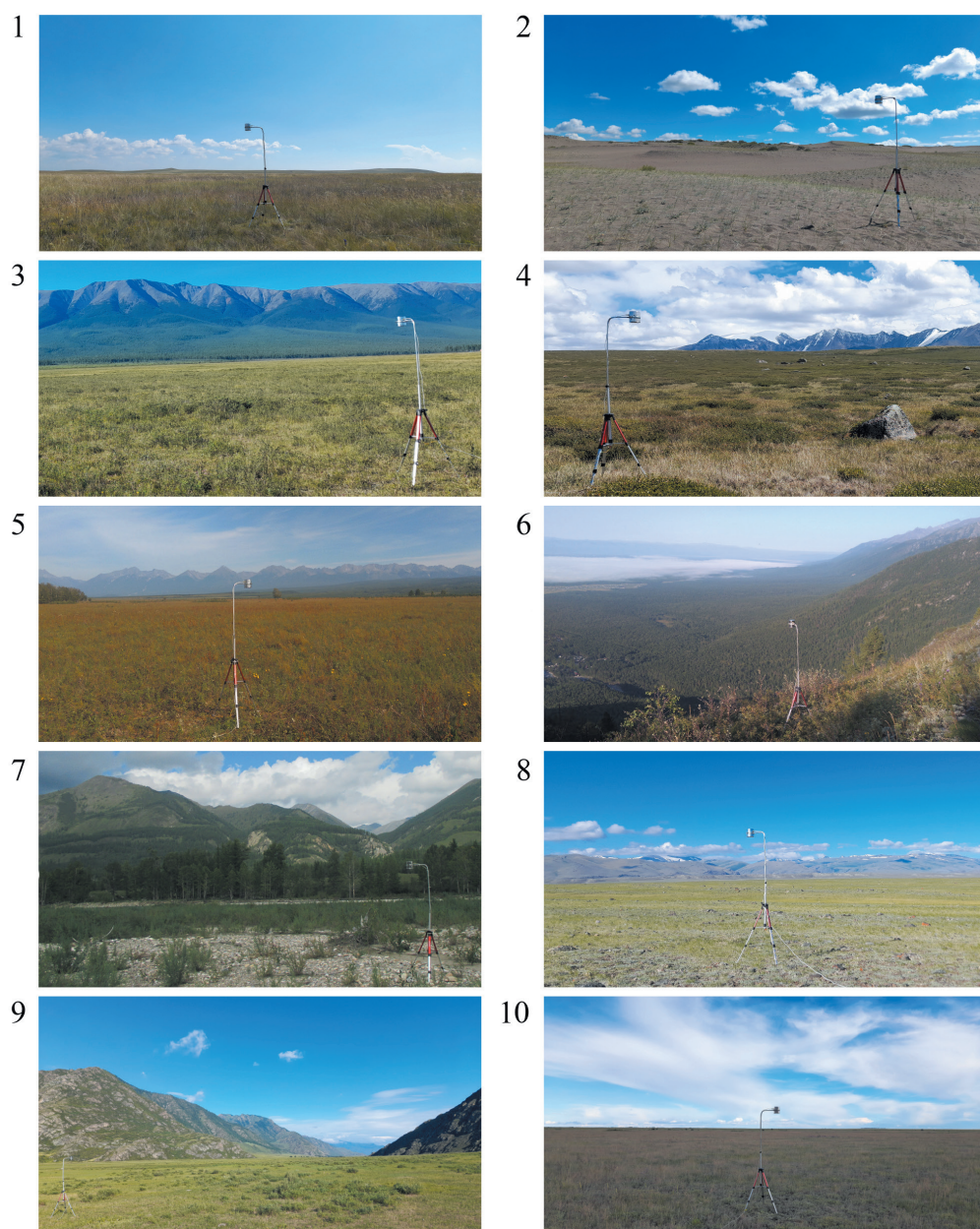


Рис. 2. Расположение флюксометра в пунктах наблюдений 1—10.

Fig. 2. Location of the field mill in the observation sites 1—10.

Результаты исследований

Перейдём к рассмотрению полученных результатов. Основные статистические характеристики изменчивости градиента потенциала электрического поля в пунктах наблюдений в условиях электрически невозмущённой атмосферы представлены в табл. 2, а их визуализация в виде квантильных диаграмм («ящиков с усами») — на рис. 3. При анализе результатов, представленных в табл. 2 и рис. 3, было отмечено следующее.

Таблица 2

Среднее арифметическое значение (M), среднеквадратическое отклонение (σ), медиана (Me), интерквартильное расстояние ($IQR = P_{75} - P_{25}$), а также значения, соответствующие 5-, 25-, 75- и 95-перцентилям (P_5, P_{25}, P_{75} и P_{95}), для градиента потенциала электрического поля (В/м) в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений

Mean (M), standard deviation (σ), median (Me), interquartile range ($IQR = P_{75} - P_{25}$), and values corresponding to the 5th, 25th, 75th and 95th percentiles (P_5, P_{25}, P_{75} and P_{95}), of $\nabla\phi$ (V/m) under fair-weather conditions at observation sites

№ ПН	M	σ	Me	IQR	P_5	P_{25}	P_{75}	P_{95}
1	77	48	68	38	25	51	89	149
2	92	28	89	29	52	76	105	137
3	75	38	69	26	42	57	83	119
4	115	31	112	33	77	96	129	164
5	98	21	97	30	32	65	83	112
6	136	24	130	32	81	102	119	151
7	93	38	85	48	48	65	113	161
8	83	32	82	35	34	64	99	131
9	48	16	47	19	24	37	56	77
10	65	31	65	44	14	45	88	113

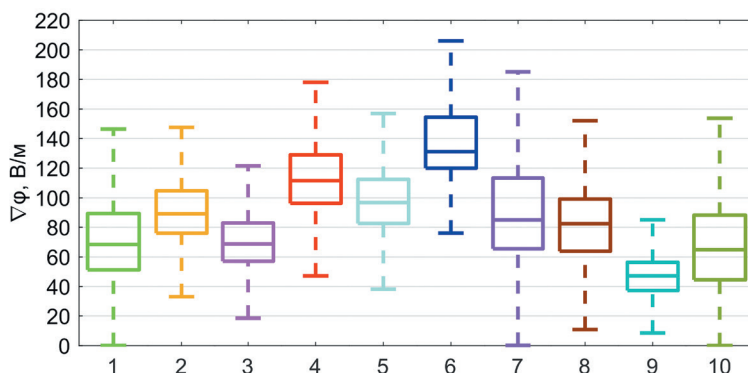


Рис. 3. Квантильные диаграммы (box-plot) для изменчивости градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений 1—10.

Fig. 3. The box-plot quartile diagram of the variability of potential gradient under fair-weather conditions in the observation sites 1—10.

При увеличении абсолютной высоты местности отмечается увеличение средних (медианных) значений градиента потенциала. В частности, это видно из попарного сравнения медианных значений градиента потенциала в ПН-10 ($h = 130$ м н. у. м., $\nabla\varphi = 65$ В/м), ПН-1 ($h = 540$ м н. у. м., $\nabla\varphi = 68$ В/м), ПН-2 (910 м н. у. м., $\nabla\varphi = 89$ В/м), ПН-8 (1930 м н. у. м., $\nabla\varphi = 82$ В/м), ПН-4 (2490 м н. у. м., $\nabla\varphi = 110$ В/м). Все эти пункты расположены на относительно плоских участках местности с малой кривизной поверхности (на равнине, в центре обширных котловин, на плато). Подобная зависимость ранее отмечалась на Кавказе [8] и предположительно связана с изменением электрических характеристик столба атмосферы (электропроводности, сопротивления и других) при увеличении абсолютной высоты местности.

Кроме абсолютной высоты местности значительное влияние на градиент потенциала оказывает форма рельефа (кривизна поверхности). Так, для ПН-9, который находится в узкой горной долине (ущелье), характерны более низкие средние значения и небольшой размах градиента потенциала, чем для равнинной местности в ПН-10, несмотря на то, что его абсолютная высота на ~ 400 м выше, чем у последнего. Тот же эффект наблюдается в ПН-7, расположенном на ~ 600 м выше ПН-5, среднее значение $\nabla\varphi$ здесь ниже, чем в последнем. Оба пункта находятся в котловинах веретенообразной формы (в Тункинской и Мондинской соответственно), однако их ширина сильно отличается. Так, Тункинская котловина в центральной части имеет ширину (расстояние от хребта Тункинские гольцы до хребта Хамар-Дабан) около 40 км, в то время как ширина Мондинской котловины вблизи пункта составляет всего около 5 км. Похожая особенность отмечается для ПН-3 и ПН-2. В ПН-3, расположенном у подножья протяжённого горного хребта (Восточный Танну-Ола) с относительной высотой более 1500 м, средние значения $\nabla\varphi$ ниже, чем в ПН-2, находящемся на плоском дне обширной котловины (Тувинской), хотя его абсолютная высота на 100 м больше, чем у последнего. Противоположная ситуация отмечается при сравнении средних значений $\nabla\varphi$ в ПН-4 и ПН-6. В пункте 6 (отрог горного хребта) среднее значение $\nabla\varphi$ больше, чем в пункте 4 (высокогорное плато), хотя абсолютная высота хребта на 1000 м меньше, чем у плато. Указанные выше особенности можно объяснить влиянием кривизны поверхности на изменение напряжённости электрического поля (густоту силовых линий): по сравнению с плоской поверхностью выпуклые части рельефа обуславливают повышение значений напряженности поля, а отрицательные формы рельефа и точка у основания положительных, наоборот, приводят к его снижению. При этом высокогорное плато приближённо может считаться плоскостью с большой абсолютной высотой.

Наконец, можно отметить ещё один важный фактор, оказывающий влияние на приземное электрическое поле в электрически невозмущённых атмосферных условиях — локальные условия окружающей среды (влажность воздуха, содержание аэрозоля в воздухе, радиационный фон и другие факторы). Так, например, при сравнении средних значений $\nabla\varphi$ в ПН-2 и ПН-5, которые расположены в аналогичных условиях рельефа (в центре Тувинской и Тункинской котловин соответственно), можно отметить, что в ПН-5, находящемся на 140 м ниже пункта

ПН-2, средние значения $\nabla\varphi$ больше, чем в последнем. Из этого можно предположить, что при схожих физико-географических условиях (сопоставима абсолютная высота и подобная форма рельефа) в пунктах наблюдений различие измеренных значений $\nabla\varphi$ обусловлено главным образом отличием локальных условий в них. Однако это предположение справедливо только для природных ландшафтов, имеющих минимальную антропогенную загрязнённость, а также удалённых от месторождений радиоактивных руд и активных тектонических разломов. В селитебных (антропогенных) ландшафтах влияние загрязнённости воздуха, зданий и сооружений, воздушных линий электропередачи и других антропогенных факторов на приземное электрическое поле может доминировать над физико-географическими факторами.

Для всех пунктов экспедиционных наблюдений получены оценки среднечасовых значений $\nabla\varphi$, рассчитываемых по многодневным данным за периоды ± 30 мин относительно начала каждого часа в течение суток. Для удобства сравнения суточных вариаций $\nabla\varphi$ в ПН их время было приведено ко времени центрального для региона исследования часового пояса (UTC+7). Суточные вариации абсолютных и нормированных значений градиента потенциала электрического поля представлены на рис. 4 и 5.

Согласно рис. 4, в большинстве ПН основной максимум $\nabla\varphi$ приходится на послеполуденные часы (~13—17 ч местного времени), а основной минимум — после полуночи (~00—02 ч). Также в большинстве ПН во время интенсивного прогрева подстилающей поверхности и воздуха (~07—12 ч) прослеживается быстрое возрастание градиента потенциала с последующим слабым снижением или стабилизацией — вторичный максимум и минимум, обусловленные действием конвективного генератора [6]. Согласно классификации [2, 3, 7], суточный ход $\nabla\varphi$ в ПН может быть отнесён к континентальному типу с двумя максимумами и двумя минимумами («двойная волна»). Кроме того, в предрассветные часы и во время рассвета во всех ПН отмечаются дополнительные максимум и минимум соответственно. В ПН-1, ПН-3, ПН-7 и ПН-9 также можно выделить и другие особенности суточного хода $\nabla\varphi$, предположительно, обусловленные влиянием местной циркуляции (бризовая и горно-долинная) и локальных атмосферных явлений (радиационный туман и туман испарения). В частности, во время рассвета и/или заката дополнительно регистрируются быстрые возрастания $\nabla\varphi$. Причём в ПН-1 значения $\nabla\varphi$ во время данного эффекта превышают основной (послеполуденный) максимум. В ПН-7 этот «эффект» также регистрировался в полночь (00 ч). Повышенная влажность воздуха, обусловленная орографическими условиями и относительной близостью водных объектов, в совокупности с сильным выхолаживанием подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха в антициклональных погодных условиях способствует образованию дымки (тумана). Так, среднесуточные значения относительной влажности в этих пунктах в период наблюдений значительно (до 10 % и более) превышали аналогичные значения в остальных пунктах. При этом максимумы в суточном ходе относительной влажности согласуются с возрастанием $\nabla\varphi$. Подобное повышение $\nabla\varphi$ также было зарегистрировано в ПН-8, однако оно отмечалось после захода солнца и при невысокой относительной влажности (< 70 %).

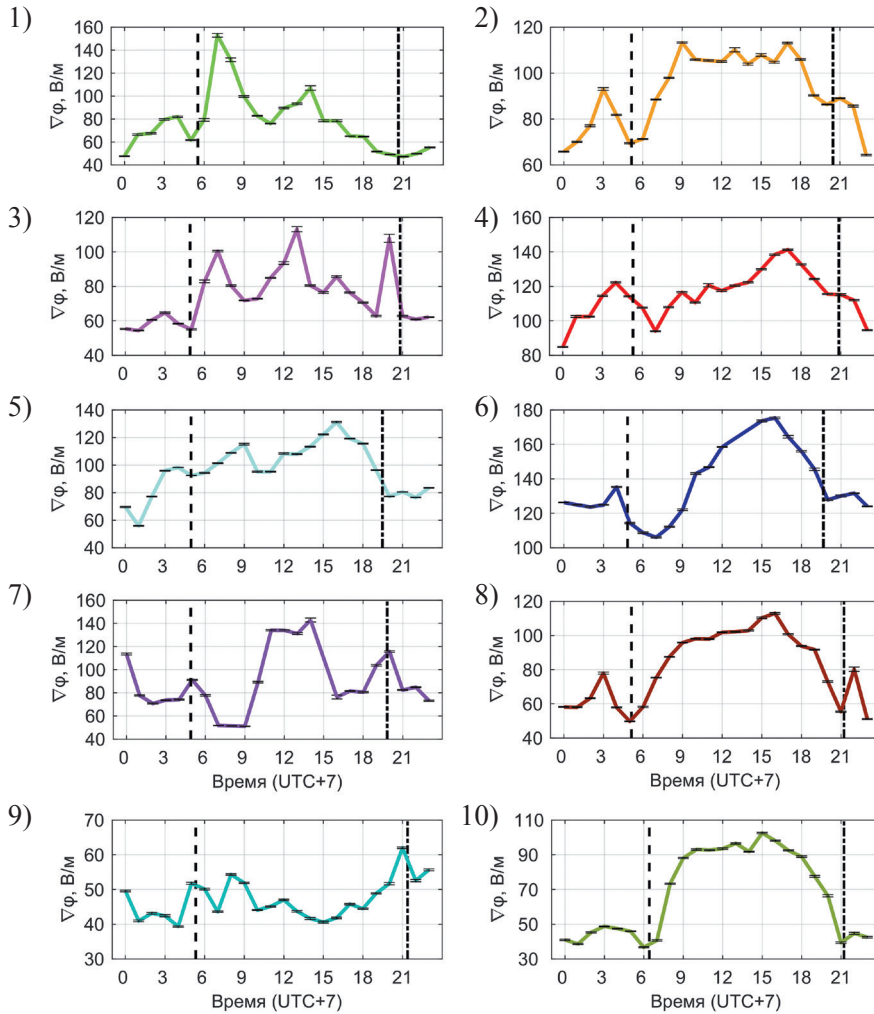


Рис. 4. Суточные вариации среднечасовых значений градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений 1—10. Ширина доверительного интервала рассчитывается как произведение коэффициента Стьюдента (t) и стандартной ошибки среднего ($\delta = \sigma/\sqrt{N}$, где σ — стандартное отклонение, N — длина выборки) в пунктах экспедиционных наблюдений 1—10.

На рисунках пунктирная и штрихпунктирная линии —
среднее время восхода и захода солнца в пунктах наблюдений.

Fig. 4. Diurnal variation of hourly means of potential gradient in observation sites 1—10. The width of the confidence interval 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).

In the figures, the dotted and dash-dotted lines —
the average times of sunrise and sunset at observation points.

Далее рассмотрим суточные вариации среднечасовых значений $\nabla\varphi$, нормированных относительно средних за периоды наблюдений в ПН (представлены в процентах от среднего). Согласно рис. 5, отмечается хорошее согласие суточного хода $\nabla\varphi$ в электрически невозмущённых атмосферных условиях в пунктах экспедиционных наблюдений ПН-2, ПН-4, ПН-5, ПН-6, ПН-8 и ПН-10. При этом, согласно рис. 6, коэффициент корреляции Пирсона для суточных вариаций $\nabla\varphi$ в этих пунктах при попарном сравнении составляет 0,5 и более, что характеризует их связь как умеренную и сильную. Наиболее сильная корреляционная зависимость (коэффициент корреляции Пирсона 0,9 и более) отмечается между пунктами ПН-2, ПН-8 и ПН-10 (рис. 6). При этом данные пункты находятся в различных регионах (Тува, Республика Алтай и Алтайский край) на большом расстоянии друг от друга (ПН-2 и ПН-8 — 450 км; ПН-8 и ПН-10 — 720 км; ПН-2 и ПН-10 — 1020 км).

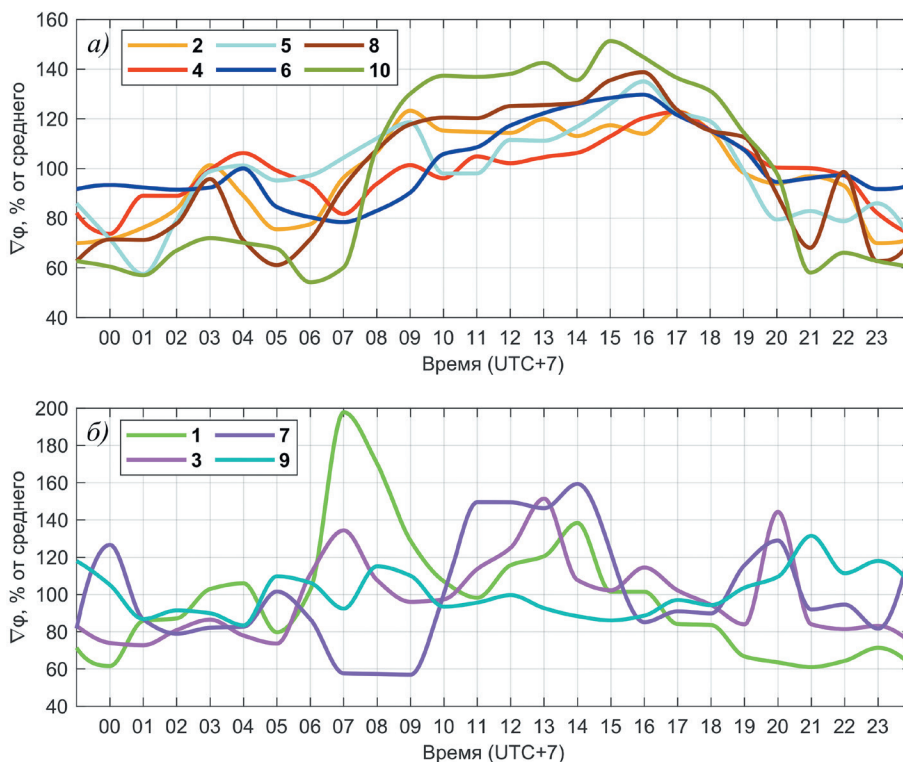


Рис. 5. Сглаженные суточные вариации нормированных значений градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» по местному времени (UTC+7) в пунктах наблюдений: а) пункты 2, 4, 5, 6, 8 и 10; б) пункты 1, 3, 7 и 9.

Fig. 5. Smoothed daily variations of the normalized values of potential gradient under fair-weather conditions at local time (UTC+7) in the observation sites: а) sites 2, 4, 5, 6, 8 and 10; б) sites 1, 3, 7 and 9.

Исходя из отмеченного, пункты экспедиционных наблюдений можно приближённо разделить на две группы:

1) пункты наблюдений с типичным для континентальных районов суточным ходом $\nabla\varphi$, имеющим два максимума и два минимума — пункты 2, 4, 5, 6, 8 и 10 (рис. 5 а);

2) пункты с более сложным суточным ходом, имеющим дополнительные максимумы в периоды рассвета и заката — 1, 3, 7 и 9 (рис. 5 б).

В первую группу входят пункты наблюдений с более сухим микроклиматом, расположенные на равнине, в центральных частях обширных котловин, на отроге южного склона горного хребта, а также на высокогорном плато. И, наоборот, ко второй группе можно отнести ПН, находящиеся в сложных физико-географических условиях (горные долины, подножье северного склона горного хребта, холмистая местность), а также имеющие более влажный микроклимат.

По данным измерений градиента потенциала в пунктах 2, 4, 5, 8 и 10, относящихся к первой группе, был получен средний суточный ход $\nabla\varphi$, который приближённо можно считать типичным для электрического поля на территории исследования в летние месяцы.

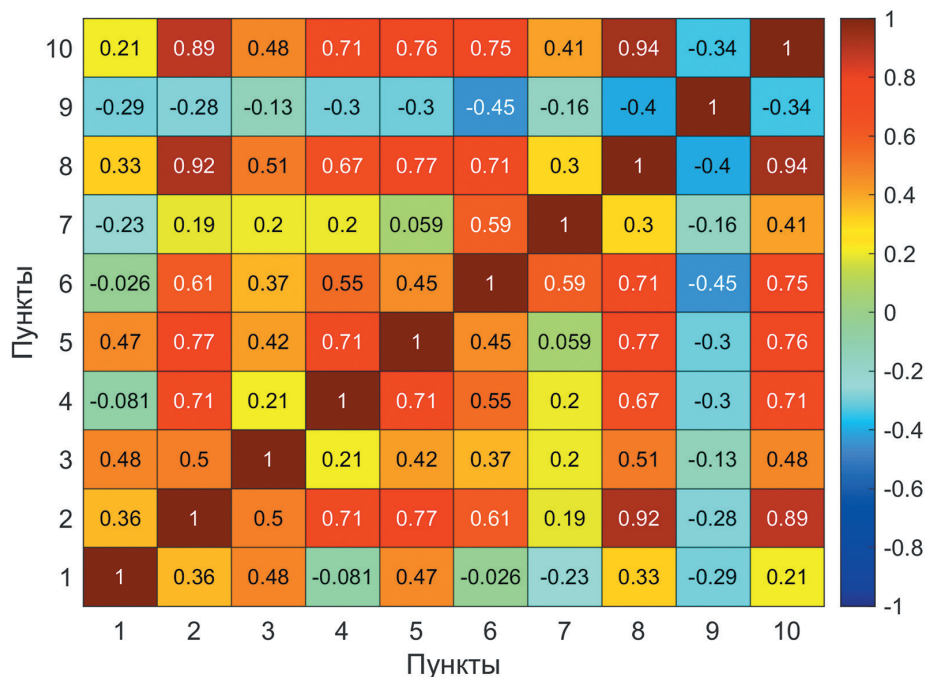


Рис. 6. Корреляционная матрица суточных вариаций градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» в пунктах наблюдений 1—10.

Fig. 6. Correlation matrix of the diurnal variability of potential gradient under fair-weather conditions in the observation sites 1—10.

Сравнение суточных вариаций нормированных значений $\nabla\varphi$ в пунктах наблюдений, представленных во всемирном координированном времени (UTC), с аналогичными вариациями, полученными за летние месяцы 2006—2020 гг. в ГО ИМКЭС (г. Томск) [13], и унитарной вариацией (кривой Карнеги) [4] показало следующее. Форма вариаций $\nabla\varphi$ в ПН и ГО ИМКЭС имеет похожий вид, однако, в городском пункте измерений вторичный максимум и минимум выражены сильнее, а время наступления основного (вечернего) максимума электрического поля наступает значительно позднее, чем в пунктах, расположенных в естественных степных и горных ландшафтах. Предположительным объяснением этого являются более высокое содержание аэрозоля в городском пункте, а также влияние городского «острова тепла», способствующее замедленному остыванию воздуха в вечерние часы и, как следствие, более позднему ослаблению конвективных потоков и турбулентного перемешивания по сравнению с природными ландшафтами. Основные минимумы и максимумы вариаций $\nabla\varphi$ в ПН сильно смещены относительно аналогичных экстремумов кривой Карнеги. Так, основной максимум в осреднённом суточном ходе $\nabla\varphi$ в ПН отмечается на ~ 10 ч UTC раньше основного максимума кривой Карнеги (рис. 7). В связи с этим суточные вариации электрического поля, полученные в экспедиционных пунктах на юге Сибири и соответствующие унитарной вариации (кривой Карнеги), имеют противофазный

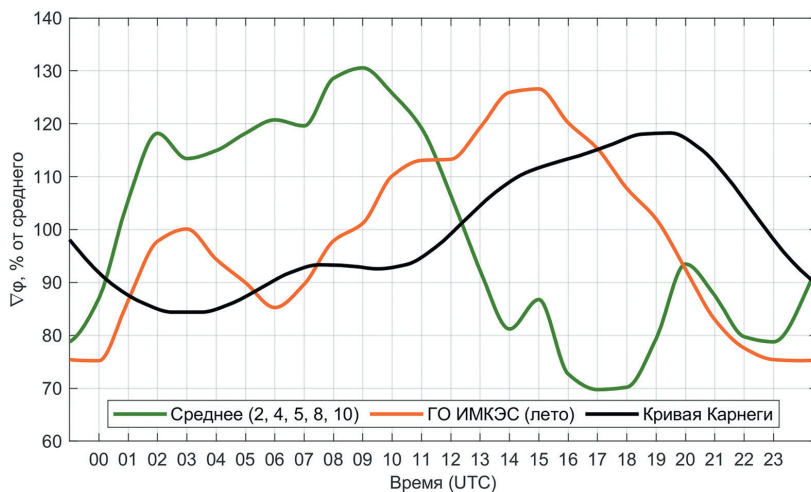


Рис. 7. Сглаженные суточные вариации нормированных значений градиента потенциала в условиях «хорошей погоды» по всемирному координированному времени (UTC) в пунктах наблюдений (средние для пунктов 2, 4, 5, 8 и 10), в ГО ИМКЭС (г. Томск; средние для летних месяцев) [13] и кривая Карнеги [4].

Fig. 7. Smoothed daily variations of the normalized values of potential gradient under fair-weather conditions at coordinated universal time (UTC) in the observation sites (the mean for points 2, 3 and 4 2, 4, 5, 8 and 10), in the IMCES GO (Tomsk; the mean for summer months) [13] and the Carnegie Curve [4].

вид. При этом отмечено, что в период 20—21 ч UTC (3—4 ч местного времени) в большинстве пунктов присутствует дополнительный пик $\nabla\varphi$, который согласуется по времени с максимумом кривой Карнеги. Особенно ярко он проявляется в пункте 4 (высокогорное плато), отмечается в ранние утренние часы (до рассвета) и его сложно объяснить только локальными условиями в пунктах наблюдений. Исходя из этого можно предположить, что он связан с проявлением унитарной вариации. Однако для подтверждения или опровержения этого требуются дополнительные исследования.

Заключение

Получены количественные оценки изменчивости градиента потенциала электрического поля в приземном слое в электрически невозмущённых атмосферных условиях «хорошей погоды» по данным экспедиционных измерений, проведённых на территории Южной Сибири в летние месяцы 2020—2023 гг.

Сравнительный анализ средних значений и характеристик изменчивости градиента потенциала, наблюдаемых в разных ландшафтных зонах на юге Сибири, показал, что при увеличении абсолютной высоты средние значения градиента потенциала в общем увеличиваются. Однако значительное влияние на их значения и изменчивость оказывают также орографические и ландшафтные особенности территории в месте наблюдения.

Суточные вариации градиента потенциала в горных и степных ландшафтах на юге Сибири в летние месяцы, в общем, имеют вид двойной волны. Минимальные значения градиента потенциала отмечаются ночью, а максимальные — в послеполуденные и вечерние часы. Перед рассветом и во время рассвета отмечаются вторичный максимум и минимум электрического поля. В период интенсивного прогрева отмечается быстрое возрастание градиента потенциала. Суточная изменчивость градиента потенциала на исследованных ландшафтах преимущественно определяется изменением солнечной радиации и температуры воздуха, с которыми связаны изменения интенсивности конвективных потоков и турбулентности, обуславливающих перераспределение радионуклидов и аэрозольных частиц. Кроме того, в ландшафтах, расположенных в сложных физико-географических условиях, отмечается более сложный суточный ход электрического поля, обусловленный дополнительным влиянием местной циркуляции и локальных атмосферных явлений.

Анализ суточной изменчивости невозмущённого электрического поля в экспедиционных пунктах на юге Сибири позволил выделить два вида суточного хода градиента потенциала. Отмечена умеренная и сильная корреляция суточных вариаций градиента потенциала в пунктах измерений, относящихся к первой группе, несмотря на значительное расстояние между ними. Получен средний нормированный суточный ход градиента потенциала, рассчитанный по данным пунктов, относящихся к первой группе и расположенных на равнине, в обширных котловинах и на плато, который приближённо можно считать типичным суточным ходом электрического поля на юге Сибири в летние месяцы.

Сравнение нормированных средних суточных вариаций градиента потенциала в экспедиционных пунктах на юге Сибири и в ГО ИМКЭС (г. Томск) показало, что их формы имеют схожий вид. Однако в городском пункте вторичные максимум и минимум выражены сильнее, и время начала основного (вечернего) максимума электрического поля наступает значительно позднее, чем в ПН в естественных ландшафтах. Предположительным объяснением этого является более высокое содержание аэрозоля в городском пункте, а также влияние городского «острова тепла».

При сравнении суточного хода электрического поля в условиях «хорошей погоды» в экспедиционных пунктах с кривой Карнеги отмечается их противофазный ход. Однако в ранние утренние часы в большинстве пунктов был зарегистрирован вторичный максимум, который согласуется по времени с максимумом кривой Карнеги и, предположительно, может быть связан с проявлением унитарной вариации в регионе исследования.

Список литературы

1. Chalmers J. A. Atmospheric electricity. Oxford: Pergamon Press, 1967. 515 p.
2. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 323 с.
3. Israël H. Atmospheric Electricity. Vol. 2: Fields, Charges, Currents. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
4. Harrison R. G. The Carnegie Curve // Surveys in Geophysics. 2013. Vol. 34. P. 209—232. doi: 10.1007/s10712-012-9210-2.
5. Bennett A. J., Harrison R. G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // Journal of Physics: Conference Series. 2008. Vol. 142. P. 012046. doi: 10.1088/1742-6596/142/1/012046.
6. 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. Vol. 50. P. 390—398. doi: 10.1134/S0001433814040112.
7. Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // Atmospheric Research. 2016. Vol. 172—173. P. 119—125. doi: 10.1134/S0001433814040112.
8. 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. Vol. 51. P. 633—638. doi: 10.1134/S000143381506002X.
9. Tacza J., Raulin J.-P., Morales C. et al. Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes // Atmospheric Research. 2021. Vol. 248. P. 105200. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105200.
10. Ahmad N., Gurmani S. F., Basit A. et al. Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient // Advances in Space Research. 2021. Vol. 67. P. 2491—2503. doi: 10.1016/j.asr.2021.01.046.
11. Nicoll K. A., Harrison R. G., Bor J. et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. Vol. 184. P. 18—29. doi: 10.1016/J.JASTP.2019.01.003.
12. 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.
13. 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. Vol. 13. P. 614. doi: 10.3390/atmos13040614.
14. 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.

15. Baishev D. G., Samsonov S. N., Moiseev A. V. et al. Monitoring and investigating space weather effects with meridional chain of instruments in Yakutia: a brief overview // *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. Vol. 3 (2). С. 25—33. doi: 10.12737/22607.
16. Smirnov S. Atmospheric Electricity Measurements in the Pacific Northwest, Russia // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 2571. doi: 10.3390/app13042571.
17. Firstov P. P., Malkin E. I., Akbashev R. R. et al. Registration of atmospheric-electric effects from volcanic clouds on the Kamchatka peninsula (Russia) // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11. P. 634. doi: 10.3390/atmos11060634.

References

1. Chalmers J. A. Atmospheric electricity. Oxford: Pergamon Press, 1967: 515 p.
2. 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 Russ.).
3. Israël H. Atmospheric Electricity. Vol. 2: Fields, Charges, Currents. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
4. Harrison R. G. The Carnegie Curve. *Surveys in Geophysics*. 2013;(34):209—232. doi: 10.1007/s10712-012-9210-2.
5. Bennett A. J., Harrison R. G. Variability in surface atmospheric electric field measurements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2008;(142): 012046. doi: 10.1088/1742-6596/142/1/012046.
6. 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;(50):390—398. doi: 10.1134/S0001433814040112.
7. Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel. *Atmospheric Research*. 2016;(172—173):119—125. doi: 10.1134/S0001433814040112.
8. 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;(51): P. 633—638. doi: 10.1134/S000143381506002X.
9. Tacza J., Raulin J.-P., Morales C. et al. Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes. *Atmospheric Research*. 2021;(248):105200. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105200.
10. Ahmad N., Gurmani S. F., Basit A. et al. Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient. *Advances in Space Research*. 2021;(67):2491—2503. doi: 10.1016/j.asr.2021.01.046.
11. Nicoll K. A., Harrison R G., Bor J. et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019;(184):18—29. doi: 10.1016/J.JASTP.2019.01.003.
12. Zaynetdinov B. G. Results of observations of the electrical characteristics of the surface layer of the atmosphere in the polar region. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voyeykova = Proceedings of A. I. Voikov Main Geophysical Observatory*. 2018;(588):47—61. (In Russ.).
13. 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;(13):614. doi: 10.3390/atmos13040614.
14. Toropov A. A., Kozlov V. I., Karimov R. R. Variations of the atmospheric electric field according to observations in Yakutsk. *Nauka i obrazovaniye = Science and education*. 2016;(2):58—65. (In Russ.).
15. Baishev D. G., Samsonov S. N., Moiseev A. V. et al. Monitoring and investigating space weather effects with meridional chain of instruments in Yakutia: a brief overview. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017;(3):25—33. doi: 10.12737/22607.
16. Smirnov S. Atmospheric Electricity Measurements in the Pacific Northwest, Russia. *Applied Sciences*. 2023;(13):2571. doi: 10.3390/app13042571.
17. Firstov P. P., Malkin E. I., Akbashev R. R. et al. Registration of atmospheric-electric effects from volcanic clouds on the Kamchatka peninsula (Russia). *Atmosphere*. 2020;(11):634. doi: 10.3390/atmos11060634.

Информация об авторах

Константин Николаевич Пустовалов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, const.pv@yandex.ru.

Пётр Михайлович Нагорский, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, prm_sta@mail.ru.

Мария Викторовна Оглезнева, младший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, oglezneva.m@yandex.ru.

Артыш Алашович Сат, младший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, artysh.sat@gmail.com.

Сергей Васильевич Смирнов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, smirnov@imces.ru.

Information about authors

Konstantin N. Pustovalov, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, National Research Tomsk State University.

Petr M. Nagorsky, Doctor of Sciences (Phys. and Math. Sci.), Professor, Principal Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Mariya V. Oglezneva, Junior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Artysh A. Sat, Junior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Sergei V. Smirnov, PhD (Phys. and Math. Sci.), Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, National Research Tomsk State University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.10.2023

Принята к печати после доработки 01.04.2024

The article was received on 11.10.2023

The article was accepted after revision on 01.04.2024