

Изменчивость приземного электрического поля под влиянием метеорологических условий по данным наблюдений в г. Томске

К.Н. Пустовалов^{✉ 1,2}, П.М. Нагорский¹, М.В. Оглезнева¹, С.В. Смирнов^{1,2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 23.04.2024;
после доработки 14.05.2024;
принята к печати 16.05.2024

Электрическое поле атмосферы наряду с электропроводностью и ионизацией воздуха является основной характеристикой атмосферного электричества — совокупности электрических явлений, происходящих в атмосфере, в том числе в облаках и осадках. Существует тесная связь между напряженностью (или градиентом потенциала) электрического поля атмосферы и рельефом, ландшафтом местности, метеорологическими величинами. Возмущение нормального электрического поля, характерного для условий «хорошей погоды», происходит при образовании и развитии облачности, выпадении осадков, грозовой деятельности и др. Изменчивость электрического поля обусловлена целым рядом отдельных или совокупностью как глобальных, так и региональных (локальных) факторов. Поэтому изучение и понимание функционирования глобальной электрической цепи и ее локальной изменчивости представляется актуальной научной проблемой, особенно в условиях современных климатических изменений. В работе представлены результаты анализа изменчивости градиента потенциала электрического поля и метеорологических величин на основе данных многолетних наблюдений на территории крупного городского населенного пункта (г. Томск). Они показывают, что в условиях «хорошей погоды» наблюдается ярко выраженная, особенно в зимнее время, зависимость градиента потенциала от направления ветра, связанная, как мы полагаем, с переносом аэрозоля. Также установлено, что изменчивость приземного электрического поля, включая сезонные и суточные вариации, в совокупности всех метеорологических условий значительно отличается от таковой в условиях исключительно «хорошей погоды». Полученные результаты хорошо согласуются с подобными исследованиями в других точках наблюдений, расположенных вблизи крупных населенных пунктов, и представляют интерес для моделирования состояния и изменчивости глобальной электрической цепи в зависимости от различных физико-географических и метеорологических условий.

Ключевые слова: метеорологические наблюдения, атмосферное электричество, градиент потенциала электрического поля, направление ветра; meteorological observations, atmospheric electricity, electric field potential gradient, wind direction.

Введение

Измерения характеристик атмосферного электричества в приземном слое проводятся уже более 150 лет и дают информацию как о локальном электрическом состоянии, так и о функционировании всей глобальной электрической цепи [1–3]. Среднесуточная вариация градиента потенциала электрического поля, известная как унитарная вариация (кривая Карнеги), наблюдаемая в планетарном масштабе и не зависящая от места измерения, представляет

собой изменение атмосферного электрического поля под влиянием электрической активности в атмосфере Земли в целом (гроз, электрически заряженных облаков и др.) и, возможно, внеатмосферных факторов [4–6]. Однако региональные и локальные факторы также могут существенно влиять на фоновые значения градиента потенциала и их сезонные и суточные вариации в различных регионах земного шара [7–10].

Особенно сильное воздействие локальных факторов на приземное электрическое поле наблюдается в селитебных (антропогенных) ландшафтах, в частности на городских и промышленных территориях. Основным таким фактором является изменчивость содержания аэрозольных частиц в атмосфере (особенно мелкодисперсных). Например, в [11, 12] показано, что с ростом концентрации

* Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru); Петр Михайлович Нагорский (npm_sta@mail.ru); Мария Викторовна Оглезнева (oglezneva.m@yandex.ru); Сергей Васильевич Смирнов (smirnov@imces.ru).

аэрозольных частиц в приземном слое (в том числе вследствие задымления) уменьшаются прозрачность атмосферы, электропроводность воздуха, дальность видимости и растет напряженность (градиента потенциала) приземного электрического поля. При увеличении содержания аэрозоля в средней и верхней тропосфере (формирование приподнятых аэрозольных слоев) напряженность приземного электрического поля, наоборот, снижается [13].

В работах [14, 15] показано, что в приземном слое важным фактором, определяющим изменение электропроводности воздуха и электрического поля, является направление ветра. Известно, что на приземное электрическое поле также оказывают влияние облака нижнего яруса и вертикального развития (в особенности кучево-дождевые), различные атмосферные явления (грозы, осадки, туманы, пыльные бури и др.), вулканическая и сейсмическая активность, магнитные бури [16–26].

Ранее в [27] по данным многолетних наблюдений (2006–2020 гг.) были получены оценки годовой, сезонной и суточной изменчивости градиента потенциала электрического поля в Томске в условиях «хорошей погоды» и проведен анализ его взаимосвязи с основными метеорологическими и геофизическими величинами, в том числе скоростью ветра. Однако влияние на приземное электрическое поле совокупности всех метеорологических условий в целом и направления ветра в частности не рассматривалось. В [28] были получены оценки изменчивости характеристик ветра в Томске в первой декаде XXI в. по данным гидрометеорологической станции (ГМС) Томск и TOR-станции ИОА СО РАН, расположенных друг от друга на расстоянии ~6 км в южной и юго-восточной частях города соответственно. Было отмечено, что преобладающее направление ветра в первом пункте наблюдения — юго-западное, во втором — южное. По данным обоих пунктов наблюдений, в Томске увеличилась повторяемость юго-западных ветров и снизилась повторяемость южных ветров по сравнению с XX в.

В [29] проанализированы условия возникновения в приземном слое экстремальных концентраций субмикронных аэрозольных частиц на территории томского Академгородка в зимние периоды 2016–2022 гг. Авторы показали, что при сочетании приземной инверсии температуры и слабого (до 1,5 м/с) ветра концентрации аэрозоля относительно средне-сезонных увеличиваются в три раза, а при слабом северо-западном ветре — в 7–8 раз.

Цели настоящей работы — сравнительный анализ изменчивости приземного электрического поля на территории крупного городского населенного пункта в совокупности всех метеорологических условий и в условиях исключительно «хорошей погоды» (т.е. электрически невозмущенных атмосферных условиях), а также оценка изменчивости градиента потенциала электрического поля в зависимости от направления ветра как одной из основных метеорологических величин.

1. Материалы и методы

В исследовании использованы данные атмосферно-электрических и метеорологических измерений в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС) в 2006–2020 гг. Обсерватория (56,48° с.ш.; 85,05° в.д.; 167 м н.у.м.) располагается в юго-восточной части г. Томска в Академгородке (рис. 1) и удалена на расстоянии ~100 м от TOR-станции ИОА СО РАН.

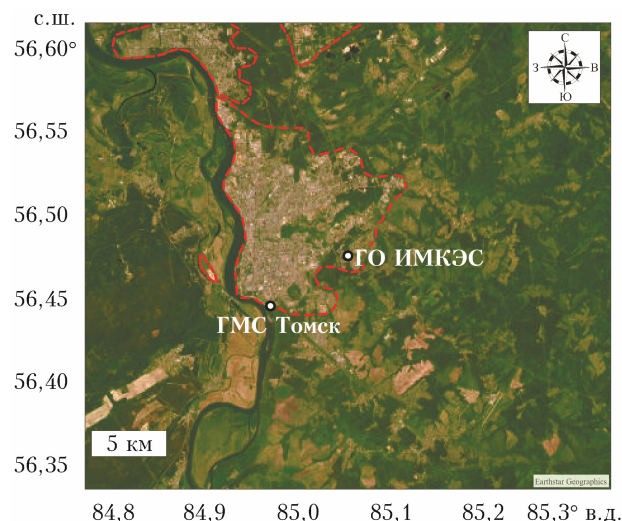


Рис. 1. Местоположение ГО ИМКЭС и ГМС Томск (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.08>)

Измерения градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi = -E = d\phi/dz$, где E — напряженность электрического поля; ϕ и z — электростатический потенциал и высота соответственно) в ГО ИМКЭС выполнялись с 2006 по 2017 г. с помощью флюксметра «Поле-2» (ГГО им. А.И. Воейкова, СССР), а с 2015 г. по настоящее время — флюксметром CS110 (Campbell Scientific, США). Направление ветра (D) определялось с помощью анеморомбометра М-63М-1, установленного на высоте 30 м. Анализировались среднeminутные значения D и $\nabla\phi$.

Для анализа изменчивости $\nabla\phi$ и D в совокупности всех метеорологических условий были использованы все данные измерений в ГО ИМКЭС, а для условий «хорошей погоды» — только те, что были получены в периоды, когда количество облаков не превышало пяти баллов, отсутствовали облака нижнего яруса и вертикального развития, грозы, дожди, туманы, мгла, метели, пыльные бури или задымления, а средняя скорость ветра была в пределах 6 м/с. Периоды «хорошей погоды» отбирались из данных метеорологических наблюдений за облачностью и метеоявлениями на ГМС Томск (WMO ID 29430); они составили около 14% от всех метеоусловий.

Для исключения экстремально высоких и низких значений $\nabla\phi$, обусловленных кратковременными нарушениями условий «хорошей погоды», произво-

дидась дополнительная фильтрация выбросов. Эти нарушения вызваны прохождением внутримас-совых кучево-дождевых облаков, которые не были зарегистрированы на ГМС Томск и, как следствие, не исключены при отборе. Так как для случаев прохождения кучево-дождевых (грозовых) облаков характерны значения $\nabla\varphi < -500$ и > 1000 В/м [16–18, 20, 21], то эти значения и были взяты в качестве пороговых.

Отбор, обработка и статистический анализ дан-ных, а также визуализация полученных результатов выполнялись на языке программирования MatLab.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Изменчивость приземного электрического поля в условиях «хорошей погоды» и в совокупности всех метеорологических условий

Результаты анализа изменчивости $\nabla\varphi$ в сово-купности всех метеоусловий и в условиях «хорошей погоды» представлены на рис. 2 и в таблице. Как видно, среднее арифметическое и модальное значе-ния $\nabla\varphi$ в Томске в первом случае составляют 180 и 195 В/м, а во втором – 282 и 252 В/м соответ-ственно.

Типичный диапазон изменения $\nabla\varphi$ ($P_{25} \div P_{75}$) в совокупности всех метеоусловий составляет 86–307 В/м, минимальные и максимальные значе-ния $\nabla\varphi$ при уровне значимости 0,05 (P_5 и P_{95}) рав-ны –218 и 588 В/м соответственно. В условиях

Статистические характеристики изменчивости градиента потенциала электрического поля в совокупности всех метеоусловий и в условиях «хорошей погоды» в Томске

Характеристика	Совокупность всех метеоусловий	Условия «хорошей погоды»
M	180	282
σ	680	182
Me	195	252
$IQR (P_{75}-P_{25})$	221	211
P_5	–218	37
P_{25}	86	161
P_{75}	307	372
P_{95}	588	638

Примечание. M – среднее; σ – СКО; Me – ме-диана; $IQR (P_{75}-P_{25})$ – интерквартильный размах; P_5 , P_{25} , P_{75} и P_{95} – 5-, 25-, 75- и 95-й процентиля соответственно.

«хорошей погоды» типичный диапазон изменения $\nabla\varphi$ составляет 37–638 В/м, минимальные и макси-мальные значения $\nabla\varphi$ (при $\alpha = 0,05$) – 37 и 638 В/м соответственно. Таким образом, среднее арифмети-ческое и медианное значения $\nabla\varphi$ в условиях «хо-рошей погоды» в 1,6 и 1,3 раза больше, чем анало-гичные значения для совокупности всех метеоусло-вий. Полный размах ($P_{95}-P_5$) и интерквартильный размах (IQR) в условиях «хорошей погоды», на-оборот, в 1,3 и 1,1 раза меньше, чем для совокуп-ности метеоусловий.

Сезонную изменчивость $\nabla\varphi$ в условиях «хоро-шей погоды» в Томске можно приближенно описать простой волной с минимумом летом и максимумом

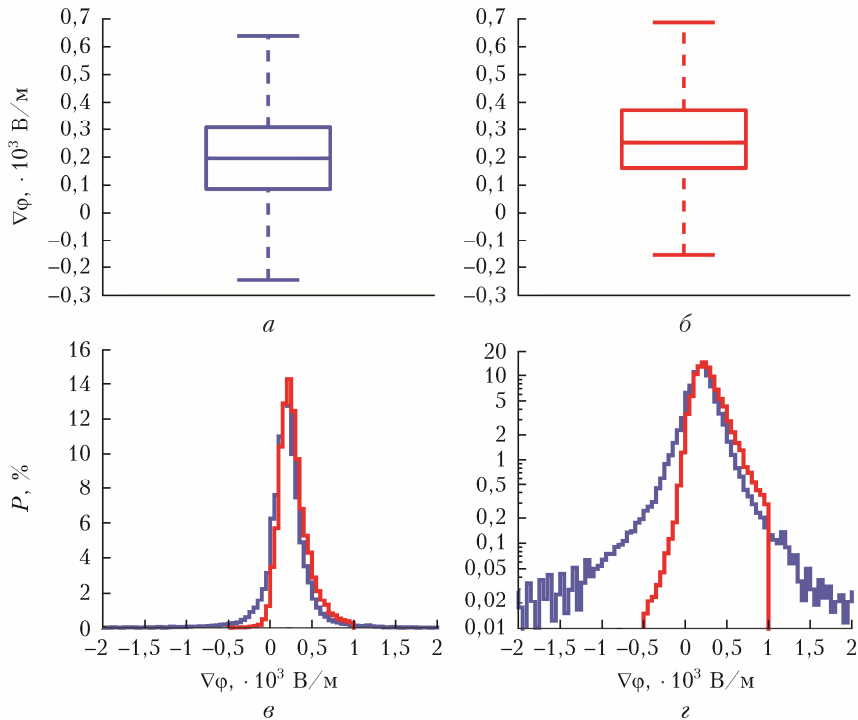


Рис. 2. Диаграммы изменчивости градиента потенциала электрического поля в совокупности всех метеоусловий (а) и в условиях «хорошей погоды» (б) в Томске, а также объединенные гистограммы распределений (повторяемости) значе-ний $\nabla\varphi$ в этих условиях (серая кривая – все метеоусловия, черная – «хорошая погода»), представленные в линейном (в) и логарифмическом (г) масштабах (см. цв. рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.08>)

зимой, что хорошо согласуется с оценками, полученными для других регионов [1–3]. Для совокупности всех метеоусловий кривая имеет более сложную форму (рис. 3, *а*). В частности, минимум $\nabla\varphi$ смещается с летних месяцев на весенние (абсолютный минимум – в мае), наблюдается также вторичный минимум осенью. Данные особенности сезонной изменчивости, возможно, обуславливаются повышенной повторяемостью в переходные периоды (весна и осень) осадкообразующих облаков нижнего яруса (*Ns*, *St*) и вертикального развития (*Cb*), с которыми связаны сильные возмущения приземного электрического поля преимущественно отрицательного знака [16–18, 20, 21].

Среднегодовой суточный ход $\nabla\varphi$ в условиях «хорошей погоды» (рис. 3, *б*) имеет характерные утренний минимум около 07:00 и вечерний максимум около 21:00. Форма суточной вариации $\nabla\varphi$ в Томске подобна форме унитарной вариации электрического поля (кривой Карнеги) [4], однако ее

минимум и максимум смещены относительно аналогичных экстремумов кривой Карнеги на более раннее время (03:00 и 05:00 соответственно). Летом в суточном ходе $\nabla\varphi$ отмечаются вторичные максимум и минимум, обусловленные конвективным генератором – увеличением концентрации аэрозоля и уменьшением локальной проводимости при развитии конвекции [8]. Они отсутствуют в унитарной вариации электрического поля, но при этом отмечаются во многих континентальных пунктах наблюдений [3, 7–9]. Амплитуда среднегодового суточного хода $\nabla\varphi$ в условиях «хорошей погоды» составляет ~56% от многолетнего среднего значения $\nabla\varphi$. Это хорошо согласуется с данными, полученными в других континентальных пунктах наблюдений [1–3]. Однако в зимние месяцы суточная амплитуда $\nabla\varphi$ достигает 100% от многолетнего среднего.

Суточные вариации $\nabla\varphi$ в совокупности всех метеоусловий отличаются от аналогичных вариаций в условиях «хорошей погоды» наличием дополнительного минимума в послеполуденные часы, который наиболее ярко проявляется в летние месяцы. Объяснить его появление можно развитием в этот период внутримассовых конвективных облаков, в том числе кучево-дождевых, а также выпадение ливневых осадков, с которыми в теплый период связаны преимущественно отрицательные возмущения электрического поля [16–18, 20, 21].

2.2. Изменчивость направления ветра и ее влияние на приземное электрическое поле

Результаты анализа изменчивости направления ветра в Томске по данным ГО ИМКЭС в совокупности всех метеоусловий и в условиях «хорошей погоды» показаны на рис. 4. Согласно рис. 4, *а* для всех метеоусловий в 2006–2020 гг. наибольшую повторяемость имели юго-западные и юго-юго-западные ветры, а наименьшую – северные.

Для условий «хорошей погоды» распределение повторяемости *D* значительно отличается (см. рис. 4, *б*). Хотя юго-западное направление по-прежнему имеет высокую повторяемость, преобладающими становятся восточное и восточно-северо-восточное направления. Минимальная повторяемость северного ветра сохраняется. Таким образом, в томском Академгородке в 2006–2020 гг. доминировал юго-западный ветер, а в условиях «хорошей погоды» – восточный.

Анализ распределения средних значений градиента потенциала с учетом направления ветра (рис. 5) показал, что как во всех метеоусловиях, так и в условиях «хорошей погоды» максимальные значения $\nabla\varphi$ отмечаются при западном, северо-западном и северном ветрах (рис. 5, *а*). Наиболее тесная связь между этими величинами наблюдается в условиях «хорошей погоды», при которых $\nabla\varphi$ выше многолетних средних в 1,6–1,9 раза. Максимумы $\nabla\varphi$ в ГО ИМКЭС в условиях «хорошей погоды» были зарегистрированы для западо-северо-западных ветров.

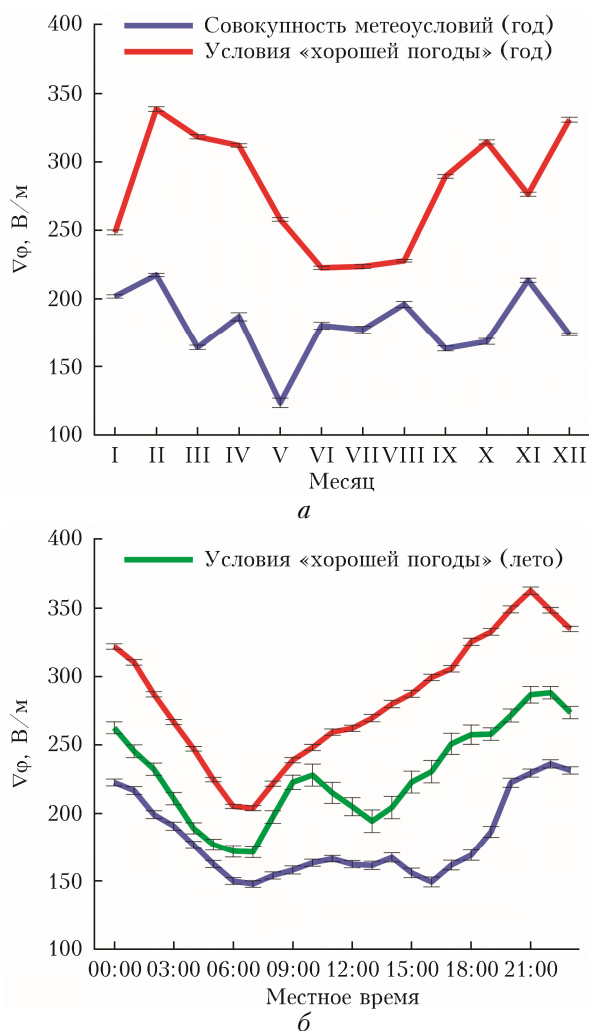


Рис. 3. Многолетние средние годовые (*а*) и суточные (*б*) вариации градиента потенциала в совокупности всех метеоусловий и в условиях «хорошей погоды» в Томске (см. цв. рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.08>)

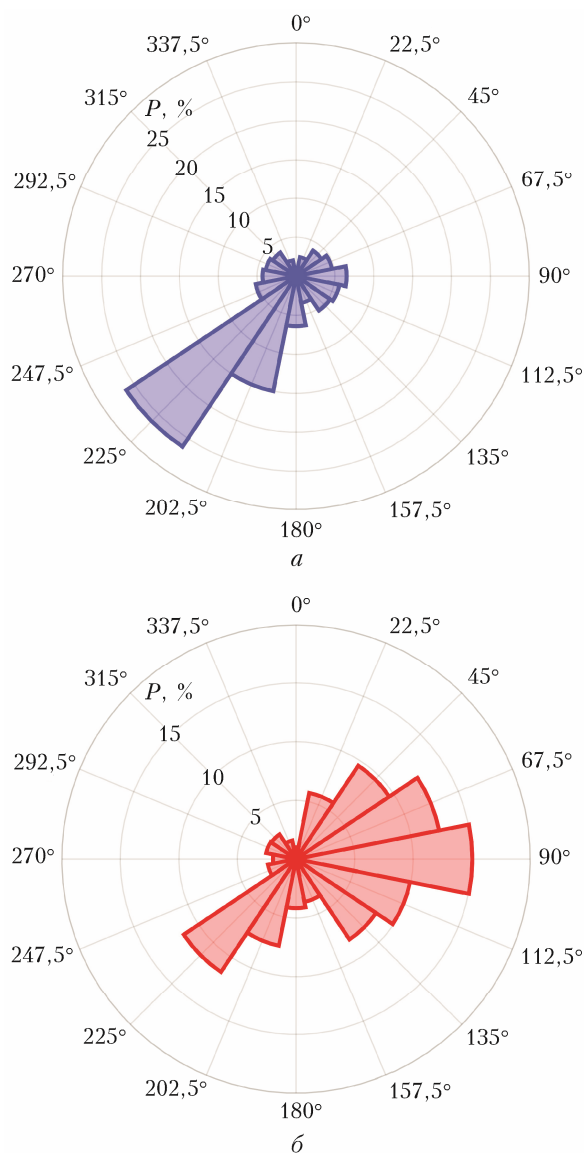


Рис. 4. Повторяемость направлений ветра в совокупности всех метеоусловий (а) и в условиях «хорошей погоды» (б) по данным ГО ИМКЭС

Анализ сезонной изменчивости $\nabla\phi$ и D показал, что возрастание $\nabla\phi$ при западных, северо-западных и северных ветрах отмечается во все сезоны года, но сильнее всего проявляется зимой, слабее — летом (рис. 5, б). Из сопоставления рис. 1 и 5 видно, что западные, северо-западные и северные ветры могут переносить аэрозоль из центральной и северной частей города, являющихся основными источниками аэрозольного загрязнения окружающей среды. Эту закономерность подтверждают результаты [29], согласно которым при северо-западных ветрах зимой наблюдаются максимальные концентрации субмикронных аэрозольных частиц на TOR-станции в Академгородке. При этом (см. рис. 4) повторяемость западных, северо-западных и северных ветров в томском Академгородке невысокая: 15% для всех метеоусловий и менее 10% для условий «хорошей погоды». Минимальные значения $\nabla\phi$ в условиях

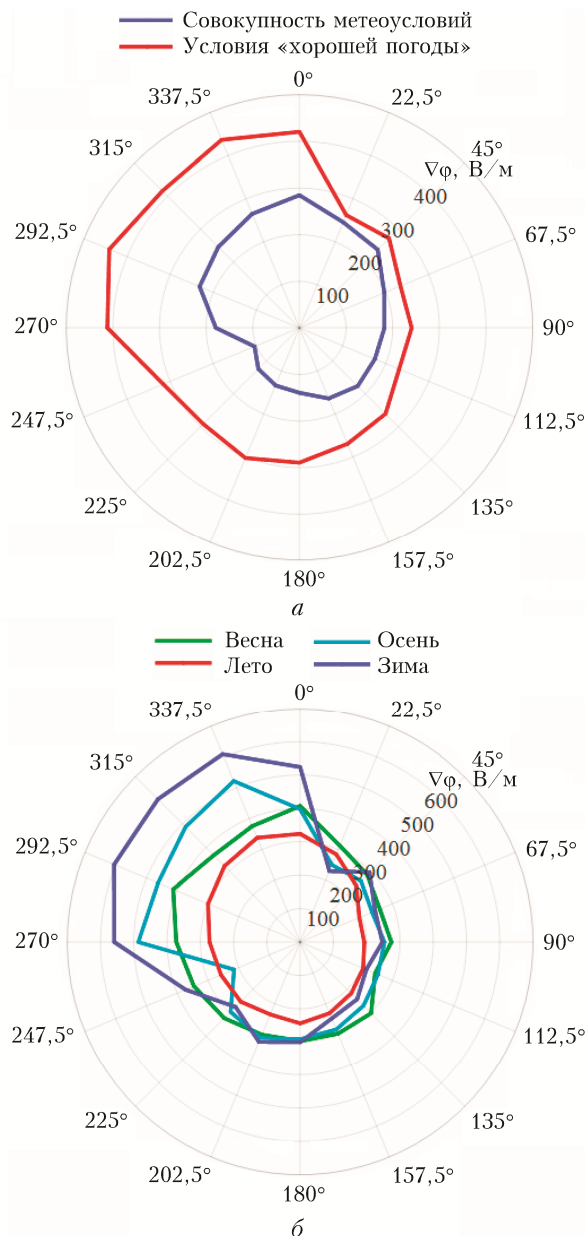


Рис. 5. Распределение средних значений градиента потенциала электрического поля в зависимости от направления ветра для совокупности всех метеоусловий и в условиях «хорошей погоды» (а), а также в отдельные сезоны года в условиях «хорошей погоды» (б) (см. цв. рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.08>)

«хорошей погоды» как за весь период наблюдений, так и в отдельные сезоны года отмечаются при восточных ветрах, переносящих воздушные массы со стороны сельской местности и лесных массивов, повторяемость которых максимальная — более 55%.

Заключение

На основе проведенного сравнительного анализа данных метеорологических и атмосферно-электрических наблюдений на территории крупной городской агломерации — г. Томска — получены оценки изменчивости градиента потенциала электрического

поля как в электрически невозмущенных атмосферных условиях (условиях «хорошей погоды»), так и в совокупности всех метеорологических условий. Показано, что общая изменчивость, а также сезонные и суточные вариации приземного электрического поля под влиянием различных метеорологических условий значительно отличаются от таковых для электрически невозмущенных атмосферных условий. В частности, средние значения градиента потенциала в совокупности всех метеорологических условий в 1,6 ниже, а их размах в 1,3 раза больше, чем в условиях «хорошей погоды», также отмечаются вторичные минимумы в сезонных и суточных вариациях.

Сравнение среднегодовых суточных вариаций $\nabla\phi$ в условиях «хорошей погоды» с унитарной (кривой Карнеги) показало их качественное сходство, однако минимум и максимум $\nabla\phi$ в Томске отмечаются, соответственно, на 3 и 5 ч раньше аналогичных экстремумов кривой Карнеги. В летние месяцы в суточном ходе $\nabla\phi$ отмечаются вторичные максимум и минимум, которые отсутствуют в унитарной вариации, но также регистрируются в других континентальных пунктах наблюдений (например, в Израиле и Пакистане).

Сравнительный анализ изменчивости направления ветра и градиента потенциала электрического поля как в различных метеорологических условиях в целом, так и исключительно в условиях «хорошей погоды» показал, что направление ветра влияет на приземное электрическое поле за счет переноса аэрозолей из локальных городских источников. При направлениях ветра от них в пункте наблюдения отмечалось снижение электропроводности воздуха и, как следствие, рост электрического поля. Данное влияние наиболее ярко проявляется в условиях «хорошей погоды» в зимние месяцы. Однако в связи с особенностями приземной циркуляции в томском Академгородке «грязные» направления ветра имеют малую повторяемость и, как следствие, их вклад в формирование приземного электрического поля в Томске можно считать незначительным.

Полученные результаты хорошо согласуются с подобными исследованиями в других пунктах наблюдений, расположенных вблизи крупных населенных пунктов (например, в пригороде Санкт-Петербурга и п.г.т. Тикси [13, 14]), и представляют интерес для моделирования состояния и изменчивости ГЭЦ в зависимости от различных физико-географических и метеорологических условий.

Благодарности. Авторы признательны наблюдателям ГО ИМКЭС за проведение непрерывных и регулярных метеорологических наблюдений и первичную обработку данных.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН, проект FWRG-2021-0001 (№ 121031300154-1).

Список литературы

1. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 420 с.
2. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометиздат, 1972. 323 с.
3. *Israël H.* Atmospheric Electricity. V. 2: Fields, Charges, Currents. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
4. *Harrison R.G.* The Carnegie curve // *Surv. Geophys.* 2013. V. 34. P. 209–232. DOI: 10.1007/s10712-012-9210-2.
5. *Mezuman K., Price C., Galanti E.* On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9, N 12. P. 124023. DOI: 10.1088/1748-9326/9/12/124023.
6. Пулинец С.А., Хачикян Г.Я. Унитарная вариация в сейсмическом режиме Земли: соответствие кривой Карнеги // *Геоматнитизм и аэрономия*. 2020. Т. 60, № 6. С. 803–808.
7. *Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh.* Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // *Atmos. Res.* 2016. V. 172–173. P. 119–125. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.12.025.
8. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Mareev E.A.* Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer // *Atmos. Res.* 2017. V. 194. P. 119–129.
9. *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 // *Adv. Space Res.* 2021. V. 67. P. 2491–2503. DOI: 10.1016/j.asr.2021.01.046.
10. *Аджиев А.Х., Куновых Г.В.* Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2015. Т. 51, № 6. С. 710–715.
11. *Пхалазов Ю.А., Ужegov В.Н., Инполитов И.И., Винарский М.В.* Исследования взаимосвязей оптических и электрических характеристик приземной атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 416–420.
12. *Harrison R.G.* Aerosol-induced correlation between visibility and atmospheric electricity // *J. Aerosol Sci.* 2012. V. 52. P. 121–126. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2012.04.011.
13. *Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В.* Дымовые шлейфы от природных пожаров и электрическое состояние приземного слоя атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 2. С. 155–161. DOI: 10.15372/AOO20220211; *Nagorskiy P.M., Pustovalov K.N., Smirnov S.V.* Smoke plumes from wildfires and the electrical state of the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022 V. 35, N 4. P. 387–393.
14. *Попов И.Б.* Особенности вариаций электрической проводимости воздуха вблизи Санкт-Петербурга // *Труды ГГО*. 2011. № 563. С. 149–165.
15. *Зайнетдинов Б.Г.* Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе // *Труды ГГО*. 2018. № 588. С. 47–61.
16. *Bennett A.J., Harrison R.G.* Atmospheric electricity in different weather conditions // *Weather*. 2007. V. 62. P. 277–283. DOI: 10.1002/wea.97.
17. *Попов И.Б.* Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // *Труды ГГО*. 2008. № 558. С. 152–161.
18. *Toropov A.A., Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Starodubtsev S.A.* Experimental observations of strengthening the neutron flux during negative lightning discharges of thunderclouds with tripolar configuration // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2013. V. 94. P. 13–18. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.12.020.
19. *Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Канустина О.В.* Вариации квазистатического электрического поля в при-

- земной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 // Геомагнитизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 4. С. 532–545.
20. Клименко В.В., Мареев Е.А., Шаталина М.В., Шлюгаев Ю.В., Соколов В.В., Булатов А.А., Денисов В.П. О статистических характеристиках электрических полей грозовых облаков в атмосфере // Изв. вузов. Радиофиз. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 864–874.
 21. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. Сравнительный анализ электрического состояния приземного слоя при прохождении кучево-дождевых облаков в теплый и холодный периоды года // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 6. С. 451–455. DOI: 10.15372/AOO20180605; Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Comparative analysis of electric state of surface air layer during passage of cumulonimbus clouds in warm and cold seasons // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 6. P. 685–689.
 22. Katz S., Yair Y., Price C., Yaniv R., Silber I., Lynn B., Ziv B. Electrical properties of the 8–12th September, 2015 massive dust outbreak over the Levant // Atmos. Res. 2018. V. 201. P. 218–225. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.11.004.
 23. Firstov P.P., Malkin E.I., Akbashev R.R., Druzhin G.I., Chereva 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. DOI: 10.3390/atmos11060634.
 24. Анисимов С.В., Шихова Н.М., Клейменова Н.Г. Отклик магнитосферной бури в атмосферном электрическом поле средних широт // Геомагнитизм и аэрономия. 2021. Т. 61, № 2. С. 172–183.
 25. Yair Y., Yaniv R. The effects of fog on the atmospheric electrical field close to the surface // Atmosphere. 2023. V. 14, N 3. P. 549. DOI: 10.3390/atmos14030549.
 26. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А., Спивак А.А., Тихонова А.В. Геофизические эффекты серии сильных землетрясений в Турции 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 142–152.
 27. Pustovalov K., Nagorskiy P., Oglezneva M., Smirnov S. The electric field of the undisturbed atmosphere in the South of Western Siberia: A case study on Tomsk // Atmosphere. 2022. V. 13, N 4. P. 614. DOI: 10.3390/atmos13040614.
 28. Кижнер Л.И., Серая Н.Ю. Изменение режима ветра в Томске в начале XXI века // Труды ГГО. 2015. № 576. С. 102–113.
 29. Яушева Е.П., Гладких В.А., Камардин А.П., Шмаргунов В.П. Экстремальные аэрозольные загрязнения атмосферы в зимний период в Академгородке г. Томска // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 9. С. 711–717. DOI: 10.15372/AOO20230902; Yausheva E.P., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Shmargunov V.P. Extreme events of aerosol pollution of the atmosphere in winter in Tomsk Akademgorodok // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N S1. P. S65–S73.

K.N. Pustovalov, P.V. Nagorskiy, M.V. Oglezneva, S.V. Smirnov. Variability of the surface electric field under the influence of meteorological conditions according to observations in Tomsk.

The electric field of the atmosphere, along with electrical conductivity and ionization of air, is the main characteristic of atmospheric electricity, which is a set of electrical phenomena occurring in the atmosphere, including in clouds and precipitation. There is a close connection between the intensity (potential gradient) of the atmospheric electric field and the topography and landscape of an area and meteorological parameters. A disruption of the normal electric field, characteristic of fair-weather conditions, occurs during the formation and development of clouds, precipitation, thunderstorm, etc. In general, the variability of the electric field is determined by a number of individual or combined factors, both of global and regional (or local) character. Therefore, studying and understanding the functioning of the Global Electric Circuit and its local variability seems to be a relevant scientific problem, especially in the context of the modern climate change. The variability of the electric field potential gradient and meteorological parameters is analyzed in this work based on long-term observations in a large urban settlement. The analysis shows a pronounced dependence of the potential gradient on the wind direction in fair-weather conditions, especially in winter, associated, we believe, with aerosol transfer. We also found that the variability of the surface electric field, including seasonal and daily variations, under all meteorological conditions significantly differs from the variability under exceptionally fair-weather conditions. The results are in good agreement with similar studies at other observation sites located near large populated areas, and are of interest for simulating the state and variability of the Global Electric Circuit depending on various physiographic and meteorological conditions.