

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ/ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.11>**ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ (НА ПРИМЕРЕ ДАННЫХ Г. НАЛЬЧИКА ЗА 2010–2020 ГГ.)**

Научная статья

Шаповалов В.А.¹, Беккиев А.М.², Аджиева А.А.^{3,*}, Бачиев Б.А.⁴, Машуков И.Х.⁵¹ORCID : 0000-0002-9701-6820;³ORCID : 0000-0002-1047-8417;⁴ORCID : 0009-0006-1818-3505;⁵ORCID : 0000-0002-3246-7970;^{1, 2, 5}Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация³Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, Нальчик, Российская Федерация⁴Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова, Махачкала, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (aida-adzhieva[at]mail.ru)

Аннотация

В работе представлены результаты применения вейвлет-анализа к вариациям электрического поля приземного слоя атмосферы. В качестве источника данных используются минутные средние значения напряженности вертикального электрического поля, зарегистрированные в г. Нальчик (Северный Кавказ) с помощью электрометра EFM550 в 2010–2020 гг. Обоснована физическая природа приземного поля и его связь с глобальной электрической цепью Земля–атмосфера–ионосфера. Рассматриваются особенности нестационарных вариаций E_z в широком диапазоне масштабов: от турбулентных до глобальных. Подробно анализируются преимущества вейвлет-преобразования при изучении нестационарных временных рядов. На основе литературного обзора выбраны типичные масштабы выявляемых вариаций: суточные, полусуточные, многодневные, сезонные, годовые и многолетние. Показана теоретическая и прикладная значимость долговременного мониторинга электрического поля как индикатора как глобальных геофизических процессов, так и локальных метеоро- и техногенных факторов.

Ключевые слова: атмосферное электрическое поле, приземное поле, вейвлет-анализ, нестационарные процессы, глобальная электрическая цепь, солнечно-земные связи, геофизическая активность, EFM550, вариации напряженности, атмосферная динамика.

WAVELET ANALYSIS OF VARIATIONS IN THE ELECTRIC FIELD STRENGTH OF THE SURFACE LAYER ATMOSPHERE (BASED ON DATA FROM NALCHIK FOR 2010–2020)

Research article

Shapovalov V.A.¹, Bekkiev A.M.², Adzhieva A.A.^{3,*}, Bachiev B.A.⁴, Mashukov I.K.⁵¹ORCID : 0000-0002-9701-6820;³ORCID : 0000-0002-1047-8417;⁴ORCID : 0009-0006-1818-3505;⁵ORCID : 0000-0002-3246-7970;^{1, 2, 5}High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation³Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Russian Federation⁴Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov, Makhachkala, Russian Federation

* Corresponding author (aida-adzhieva[at]mail.ru)

Abstract

The work presents the results of applying wavelet analysis to variations in the electric field of the surface layer. The data source used is the minute-by-minute average values of the vertical electric field intensity recorded in Nalchik (North Caucasus) using an EFM550 electrometer in 2010–2020. The physical nature of the surface field and its connection with the global Earth–atmosphere–ionosphere electrical circuit are substantiated. The specifics of non-stationary variations in E_z over a wide range of scales, from turbulent to global, are reviewed. The advantages of wavelet transformation in the study of non-stationary time series are analysed in detail. Based on a literature review, typical scales of detectable variations are selected: daily, semidiurnal, multidiurnal, seasonal, annual, and multiannual. The theoretical and applied significance of long-term monitoring of the electric field as an indicator of both global geophysical processes and local meteorological and technogenic factors is demonstrated.

Keywords: atmospheric electric field, surface field, wavelet analysis, non-stationary processes, global electric circuit, solar-terrestrial connections, geophysical activity, EFM550, intensity variations, atmospheric dynamics.

Введение

Измерение вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы (E_z) имеет фундаментальное значение для понимания процессов в системе Земля–атмосфера–Солнце. Электрическое поле формируется за счёт глобальной электрической цепи (ГЭЦ), где грозовые облака выступают генераторами, поддерживающими разность потенциалов между землёй и ионосферой (~250 кВ) [1], [2], [3]. Условия ясной погоды

создают фоновые значения напряженности порядка 120–130 В/м, чувствительные к глобальной и локальной метеообстановке [4], [5].

Ez подвержено вариациям в широком диапазоне временных масштабов — от секундных грозových всплесков до многолетних трендов. Глобальные суточные и сезонные колебания отражают ритмику генерации токов в ГЭЦ и наблюдаются синхронно на удалённых станциях (унитарные вариации) [6]. Локальные факторы (турбулентность, аэрозоль, электродный эффект) вносят свой вклад в колебания поля, особенно в приземном слое [5], [7], [8], [9].

Вейвлет-анализ — эффективный инструмент для изучения таких нестационарных процессов. В отличие от Фурье-преобразования, он даёт двумерную картину «период–время», позволяя обнаружить преходящие и квазипериодические компоненты [10]. Используемый Морле-вейвлет подходит для анализа спектра от минут до месяцев [11]. Статистическая значимость спектров подтверждается сравнением с белым шумом или по периодограмме Ломба–Скаргла [12].

Данные измерений Ez в Нальчике (10 лет, полусекундное разрешение) обеспечены электрометром EFM550 [13]. Этот прибор способен фиксировать как фоновые, так и предгрозовые поля [14]. Для выявления медленных колебаний (1–60 дней) проводится фильтрация метеоаномалий [15].

Суточная гармоника (Carnegie Curve) — основной компонент спектра Ez. Её максимум наблюдается около 19–21 UTC и связан с глобальной активностью гроз [6]. Летом при турбулентной погоде она ослабляется, зимой — усиливается. Полусуточная составляющая (~12 ч) имеет локальную природу, наблюдалась, например, в Соданкуле [16] и может быть связана с техногенным аэрозолем [17].

Многодневные вариации (~9–11, ~45 дней), обнаруженные в данных с полярных станций [4], [16], предположительно связаны с солнечными периодами (27-дневный цикл) и внутрисезонной атмосферной динамикой [18], [19]. Аналогичные сигналы зафиксированы в Бороке и Соданкуле [1], [20], а также на антарктической станции Восток.

Годовой ход Ez отражает сезонную модуляцию ГЭЦ: максимум — в июне–августе, вторичный — в декабре–январе [4]. Локальный климат региона (Нальчик) определяет форму сигнала [21]. Зимой антициклоны и стабильная погода повышают достоверность измерений Ez ясной погоды.

Короткопериодные вариации (минуты–часы) связаны с турбулентным переносом зарядов в пограничном слое и изменениями метеообстановки [2], [20]. Их проявления — всплески мощности в скалограммах, требующие интерпретации в контексте метеонаблюдений.

Ez имеет прикладное значение: грозо мониторинг, диагностика загрязнений (по росту поля при падении проводимости воздуха) [7], а также регистрация аномалий перед землетрясениями [22]. В частности, сеть из 80 станций в Китае зафиксировала отклонения Ez перед землетрясением Янби М6.4. Использование вейвлет-анализа позволяет отличать глобальные сигналы от локальных возмущений [12].

Таким образом, вейвлет-анализ Ez в Нальчике за 2010–2020 гг. позволит охватить весь спектр характерных временных масштабов, выделить устойчивые глобальные колебания и отфильтровать метеозависимые локальные эффекты. Это создаёт основу для дальнейшего применения Ez как индикатора геофизических процессов и внешних аномальных воздействий.

Методы и принципы исследования

Для анализа временной структуры вариаций напряженности приземного электрического поля (Ez) использовался непрерывный вейвлет-анализ (CWT) с комплексным базисом Морле. Вейвлет-преобразование осуществлялось над усредненными одномоментными значениями Ez, полученными на данных измерителя EFM550, установленного в г. Нальчик на здании ФГБУ «ВГИ», за период 2010–2020 гг.

Базис Морле выбран за его сбалансированные разрешающие свойства как по частоте, так и во времени, а также за наличие **фазовой компоненты**. Фазовая информация в вейвлет-преобразовании извлекается из комплексной формы коэффициентов:

$$W(t, s) = A(t, s)e^{i\phi(t, s)}$$

где:

$W(t, s)$ — комплексный вейвлет-коэффициент на моменте времени t и масштабе s ;

$A(t, s)$ — модуль (амплитуда);

$\phi(t, s)$ — фаза.

Амплитуда интерпретируется как мощность колебаний на данном масштабе, а фаза отражает временную структуру и позволяет анализировать сдвиги по времени, задержки и причинно-следственные связи между рядами.

Для выделения фазовой информации применялись:

1) фазовые карты $\phi(t, s)$ — распределения мгновенной фазы по времени и масштабам;

2) фазовые разности между соседними временными точками (градиент фазы) — для идентификации направлений эволюции сигнала;

3) фазовая когерентность между рядами (в случае сопоставления Ez с метео- и геофизическими параметрами) — как мера синфазности на различных масштабах [12].

Особое внимание уделялось фазовым сдвигам суточной и полусуточной компонент, их сезонной эволюции и возможным нарушениям симметрии, указывающим на нестандартные метео- или космические воздействия.

Вейвлет-скалограммы и фазовые карты интерпретировались с учетом конической зоны влияния (cone of influence), ограничивающей надёжность результатов у краёв временного окна. Статистическая значимость фазово-согласованных областей оценивалась по сравнению с моделью белого и красного шума (95%-доверительный уровень) [6].

Основные результаты

В результате непрерывного вейвлет-преобразования одномоментных данных E_z , собранных в Нальчике за 2010–2020 гг., были получены двумерные скалограммы мощности и фазовые карты, охватывающие временные масштабы от 10 минут до 60 суток (рис. 1).

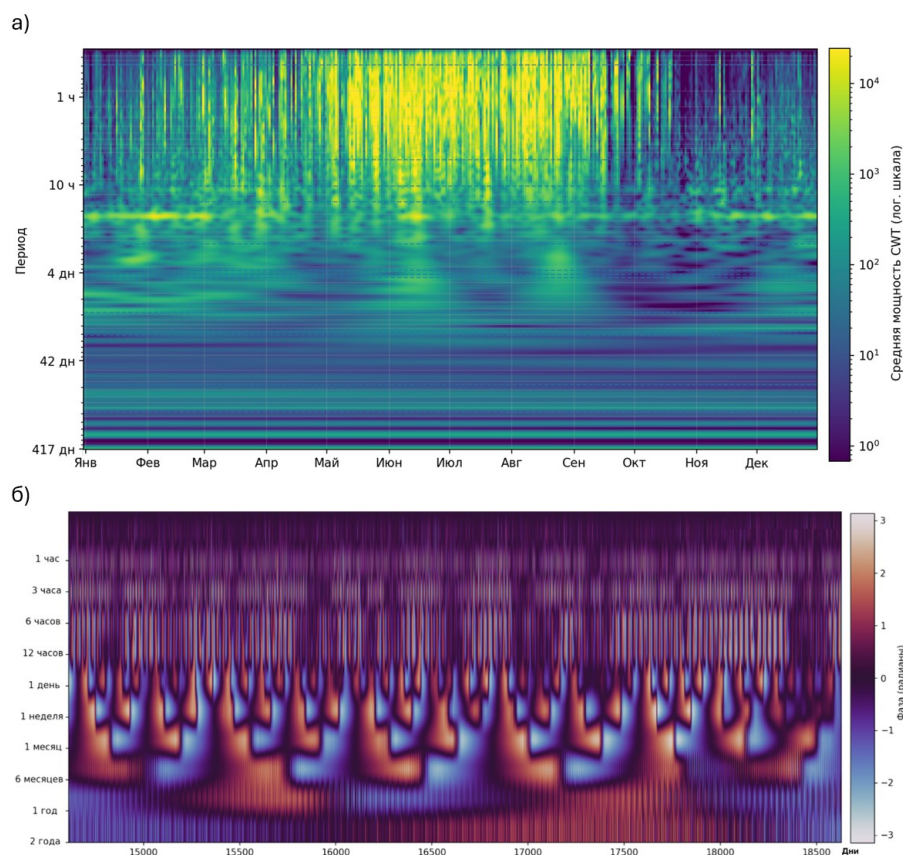


Рисунок 1 - Двумерные скалограммы мощности и фазовые карты:

a – среднегодовая скейлограмма (усредненная за 2010–2020 гг.); *б* – фазовая информация вейвлет-преобразования 2010–2020 гг.

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.161.11.1>

В спектре четко выделяются следующие типы периодичностей:

1. Суточная (24 ч) и полусуточная (12 ч) компоненты доминируют в большинстве сезонов и лет. Суточный максимум E_z стабильно приходится на 19–21 UTC, что соответствует классической Carnegie-осцилляции [6]. Полусуточная компонента выражена преимущественно летом, особенно в периоды повышенной загрязненности воздуха и устойчивой конвекции. Фазовые карты показывают квазистационарный характер суточной фазы с незначительным сезонным сдвигом (~1–2 ч) в летние месяцы.

2. Многодневные вариации выявлены в диапазонах ~9–11 суток и ~40–50 суток. Их амплитуда сравнительно мала, но статистически значима на уровне 95% в отдельные годы, особенно в 2013 и 2018 гг. Периоды ~9 суток согласуются с субгармониками 27-дневного солнечного цикла [18], [19], а ~45-дневные — с внутрисезонными атмосферными колебаниями (возможно, аналогами Madden–Julian Oscillation). Фазовая структура этих компонент демонстрирует высокую когерентность внутри года, но разнится между годами, что указывает на перемежающийся характер внешнего воздействия.

3. Сезонная эволюция проявляется как в амплитуде, так и в фазе суточного хода. На фоне летней метеонестабильности наблюдаются флуктуации фазы, вызванные наложением локальных факторов (ветер, аэрозоль, облачность). Зимой фаза суточной гармоник более стабильна и синфазна с глобальной вариацией, что подтверждает преимущественное влияние ГЭЦ в условиях антициклонального режима [4].

4. Кратковременные аномалии, отражённые в фазе как быстрые скачки, чаще фиксировались весной и осенью. Сравнение с данными метеонаблюдений показывает корреляцию с резкими изменениями скорости ветра, выпадением осадков и фронтальными прохождениями [15], [20]. Эти события сопровождаются локальной десинхронизацией фаз в суточном диапазоне, что проявляется как разрывы в фазовой согласованности.

Обсуждение

Таким образом, фазовая информация в вейвлет-преобразовании позволила не только количественно идентифицировать устойчивые временные шкалы, но и проследить их стабильность, нарушение, а также связи с внешними геофизическими и локальными метеофакторами. Фазовая когерентность, в частности, представляет собой

чувствительный индикатор синфазных процессов и может быть использована для диагностики переходов между режимами, а также раннего обнаружения возмущений (например, перед грозами или геомагнитными бурями).

Полученные результаты расширяют наше представление о спектральной и фазовой структуре E_z на средних широтах и подтверждают перспективность комплексного подхода, объединяющего высокочастотные наблюдения, вейвлет-анализ и метеогеофизическое сопровождение. В дальнейшем целесообразно проведение междисциплинарных исследований с применением вейвлет-когерентности и кросс-анализов между E_z , параметрами космической погоды и метеоанализами, что позволит углубить понимание процессов в системе Земля–атмосфера–космос.

Заключение

Проведённый вейвлет-анализ вариаций приземного электрического поля атмосферы по данным станции в Нальчике (2010–2020 гг.) позволил выявить широкий спектр временных структур — от кратковременных турбулентных флуктуаций до многодневных и сезонных колебаний. Основное внимание было уделено фазовой информации, извлекаемой из комплексных вейвлет-коэффициентов, что обеспечило более глубокое понимание динамики электрического поля и его взаимодействия с внешними и локальными факторами.

Установлено:

- 1) стабильное присутствие суточной и полусуточной компонент E_z , с сезонной модуляцией амплитуды и фазы;
- 2) наличие квазипериодических колебаний с масштабами ~9–11 и ~45 суток, потенциально связанных с солнечными циклами и крупномасштабной атмосферной циркуляцией;
- 3) выраженная фазовая когерентность между E_z и метеопараметрами (ветер, колебания влажности), особенно в суточном диапазоне;
- 4) высокая чувствительность фазовой структуры к метеоаномалиям, атмосферным фронтам и грозовой активности.

Фазовый подход в рамках вейвлет-преобразования продемонстрировал высокую эффективность в диагностике как глобальных, так и локальных источников вариаций. Он может быть использован для оперативной идентификации нарушений в функционировании глобальной электрической цепи, выявления предвестников опасных природных явлений (гроз, сейсмособытий), а также оценки степени техногенного или климатического влияния на электрическое состояние атмосферы.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Анисимов С.В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу / С.В. Анисимов, Н.М. Шихова, К.В. Афиногенов // Известия вузов, Радиофизика. — 2013. — Т. 56. — № 11-12. — С. 787–802.
2. Harrison R.G. Fair weather atmospheric electricity. / R.G. Harrison // Weather. — 2013. — № 68(4). — P. 100–105.
3. Williams E. Vertical profile of electric potential / E. Williams, E. Mareev // Atmos. Res. — 2014. — P. 228–241.
4. Burns G.B.etal An atmospheric electric circuit response to solar energetic particle events / G.B.etal Burns // J. Geophys. Res. — 2012. — P. 117.
5. Zalikhanov M.Ch. Analysis of the week electric field tensionof the electric field of the atmosphere for the territory of the CBD according to the network of four sensors EFM550 / M.Ch. Zalikhanov, S.I. Shagin, A.A. Adzhieva // IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. — 2019. — № 698. — P. 44–48.
6. Silva H.G.etal Diurnal variation of the atmospheric electric field. / H.G.etal Silva // J. Electrostatics. — 2020. — № 72(4). — P. 302–309.
7. Редин А.А. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы / А.А. Редин, Г.В. Куповых, А.С. Болдырев // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. — 2013. — Т. 56. — № 11-12. — С. 820–828.
8. Аджиев А.Х. Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений / А.Х. Аджиев, Г.В. Куповых // Доклады Академии наук. — 2015. — Т. 462. — № 2. — С. 213–216.
9. Шаповалов В.А. Электрическое поле в приземном слое атмосферы: измерения и прогнозирование его вариаций / В.А. Шаповалов, А.А. Аджиева, М.С. Нирова [и др.] // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 12(108). — С. 54–59.
10. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физ. Наук. — 1996. — Т. 166. — № 11. — С. 1145–1170.
11. Анисимов С.В. Отклик магнитосферной бури в атмосферном электрическом поле средних широт. / С.В. Анисимов, Н.М. Шихова, Н.Г. Клейменова // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2021. — № 61(2). — С. 172–183.
12. Tacza J. Periodicities in fair weather potential gradient data from multiple stations / J. Tacza [et al.] // Atmos. Res. — 2022. — № 276. — P. 106–250.

13. Аджиев А.Х. Влияние солнечного ветра на динамику электрического поля в приземном слое атмосферы / А.Х. Аджиев, Г.В. Куповых, З.М. Кереева [и др.] // Известия Южного федерального университета. Технические науки. — 2019. — № 5(207). — С. 114–122.
14. Ипполитов И.И. Динамика спектра вариаций атмосферно-электрического поля в предгрозовой атмосфере / И.И. Ипполитов, М.В. Кабанов, П.М. Нагорский [и др.] // Оптика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 25. — № 2. — С. 132–136.
15. Воцан О.Н. Вариации электрического поля в приземной атмосфере в результате прохождения холодных атмосферных фронтов / О.Н. Воцан, А.А. Спивак // Динамические процессы в геосферах. — 2024. — № 9. — С. 80–88.
16. Nicoll K.A. Measuring global signals in the potential gradient at high latitude sites / K.A. Nicoll [et al.] // Front. Earth Sci. — 2020. — № 8. — P. 614–639.
17. Кальчихин В.В. Динамика спектра атмосферно-электрических и метеорологических величин приземного слоя во время выпадения ливневых осадков / В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, П.М. Нагорский [и др.] // Труды Военно-космической академии имени АФ Можайского. — 2020. — № 674(S). — С. 188–194.
18. Смирнов С.Э. Анализ явлений космической погоды в 2014 году по наблюдениям в северо-восточном регионе России / С.Э. Смирнов, В.В. Бычков, О.В. Мандрикова [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. — 2016. — № 1(12). — С. 66–84.
19. Bennett A.J. An 11-day periodicity in atmospheric electricity. / A.J. Bennett // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. — 2007. — № 69. — P. 1211–1222.
20. Клейменова Н.Г. Утренние полярные суббури и вариации атмосферного электрического поля / Н.Г. Клейменова, О.В. Козырева, М. Кубицки [и др.] // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2010. — Т. 50. — № 1. — С. 51–60.
21. Коваленко В.А. Сезонные вариации параметров атмосферного электричества и приземного давления / В.А. Коваленко, Ю.В. Шаманский, С.И. Молодых // VI Российская конференция по атмосферному электричеству. — Нижний Новгород, 2007. — № 5. — С. 225–226.
22. Nie L. AEF anomalies before 2021 Yangbi earthquake. / L. Nie, X. Zhang // Atmosphere. — 2023. — № 14(10). — P. 1579.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Anisimov S.V. Dinamika elektrichestva nevozmushchennoi atmosfery srednix shirot: ot nablyudenii k skeilingu [Electricity dynamics of the undisturbed mid-latitude atmosphere: from observations to scaling] / S.V. Anisimov, N.M. Shikhova, K.V. Afinogenov // Izvestia vuzov, Radiofizika [Izvestia Universities, Radiophysics]. — 2013. — Vol. 56. — № 11-12. — P. 787–802. [in Russian]
2. Harrison R.G. Fair weather atmospheric electricity. / R.G. Harrison // Weather. — 2013. — № 68(4). — P. 100–105.
3. Williams E. Vertical profile of electric potential / E. Williams, E. Mareev // Atmos. Res. — 2014. — P. 228–241.
4. Burns G.B.etal An atmospheric electric circuit response to solar energetic particle events / G.B.etal Burns // J. Geophys. Res. — 2012. — P. 117.
5. Zalikhanov M.Ch. Analysis of the week electric field tensionof the electric field of the atmosphere for the territory of the CBD according to the network of four sensors EFM550 / M.Ch. Zalikhanov, S.I. Shagin, A.A. Adzhieva // IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. — 2019. — № 698. — P. 44–48.
6. Silva H.G.etal Diurnal variation of the atmospheric electric field. / H.G.etal Silva // J. Electrostatics. — 2020. — № 72(4). — P. 302–309.
7. Redin A.A. Elektrodinamicheskaya model konvektivno-turbulentnogo prizemnogo sloya atmosfery [Electrodynamic model of the convective-turbulent surface layer of the atmosphere] / A.A. Redin, G.V. Kupovikh, A.S. Boldirev // Izvestiya visshikh uchebnikh zavedenii. Radiofizika [News of Higher Educational Institutions. Radiophysics]. — 2013. — Vol. 56. — № 11-12. — P. 820–828. [in Russian]
8. Adzhiev A.Kh. Variatsii atmosfernogo elektricheskogo polya na visokogornikh punktakh nablyudenii [Variations of the atmospheric electric field at high-mountain observation points] / A.Kh. Adzhiev, G.V. Kupovikh // Dokladi Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]. — 2015. — Vol. 462. — № 2. — P. 213–216. [in Russian]
9. Shapovalov V.A. Elektricheskoe pole v prizemnom sloe atmosfery: izmereniya i prognozirovaniye yego variatsii [Electric field in the surface layer of the atmosphere: measurements and prediction of its variations] / V.A. Shapovalov, A.A. Adzhieva, M.S. Nirova [et al.] // Inzhenernii vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. — 2023. — № 12(108). — P. 54–59. [in Russian]
10. Astafeva N.M. Veivlet-analiz: Osnovi teorii i primeri primeneniya [Wavelet Analysis: Basic Theory and Application Examples] / N.M. Astafeva // Uspekhi fiz. Nauk [Achievements of Physical Sciences]. — 1996. — Vol. 166. — № 11. — P. 1145–1170. [in Russian]
11. Anisimov S.V. Otklik magnitosfernoj buri v atmosfernom e'lektricheskom pole srednix shirot [Response of a magnetospheric storm in the atmospheric electric field of mid-latitudes]. / S.V. Anisimov, N.M. Shikhova, N.G. Klejmenova // Geomagnetism and Aeronomy. — 2021. — № 61(2). — P. 172–183. [in Russian]
12. Tacza J. Periodicities in fair weather potential gradient data from multiple stations / J. Tacza [et al.] // Atmos. Res. — 2022. — № 276. — P. 106–250.
13. Adzhiev A.Kh. Vliyanie solnechnogo vetra na dinamiku elektricheskogo polya v prizemnom sloe atmosfery [The influence of solar wind on the dynamics of the electric field in the surface layer of the atmosphere] / A.Kh. Adzhiev, G.V. Kupovikh, Z.M. Kerreeva [et al.] // Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of the Southern Federal University. Technical Sciences]. — 2019. — № 5(207). — P. 114–122. [in Russian]

14. Ippolitov I.I. Dinamika spektra variatsii atmosferno-elektricheskogo polya v predgrozovoi atmosfere [Dynamics of the spectrum of atmospheric electric field variations in the pre-storm atmosphere] / I.I. Ippolitov, M.V. Kabanov, P.M. Nagorskii [et al.] // Optika atmosfery i okeana [Optics of the atmosphere and ocean]. — 2012. — Vol. 25. — № 2. — P. 132–136. [in Russian]
15. Voshchan O.N. Variatsii elektricheskogo polya v prizemnoi atmosfere v rezultate prokhozhdeniya kholodnykh atmosfernykh frontov [Variations in the electric field in the surface atmosphere as a result of the passage of cold atmospheric fronts] / O.N. Voshchan, A.A. Spivak // Dinamicheskie protsessy v geosferakh [Dynamic processes in the geospheres]. — 2024. — № 9. — P. 80–88. [in Russian]
16. Nicoll K.A. Measuring global signals in the potential gradient at high latitude sites / K.A. Nicoll [et al.] // Front. Earth Sci. — 2020. — № 8. — P. 614–639.
17. Kalchikhin V.V. Dinamika spektra atmosferno-elektricheskikh i meteorologicheskikh velichin prizemnogo sloya vo vremya vipadeniya livnevikh osadkov [Dynamics of the spectrum of atmospheric-electrical and meteorological quantities of the surface layer during heavy rainfall] / V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, P.M. Nagorskii [et al.] // Trudi Voenno-kosmicheskoi akademii imeni AF Mozhaiskogo [Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky]. — 2020. — № 674(S). — P. 188–194. [in Russian]
18. Smirnov S.E. Analiz yavlenii kosmicheskoi pogodi v 2014 godu po nablyudeniya v severo-vostochnom regione Rossii [Analysis of space weather events in 2014 based on observations in the north-eastern region of Russia] / S.E. Smirnov, V.V. Bichkov, O.V. Mandrikova [et al.] // Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki [KRAUNC Bulletin. Physical and Mathematical Sciences]. — 2016. — № 1(12). — P. 66–84. [in Russian]
19. Bennett A.J. An 11-day periodicity in atmospheric electricity. / A.J. Bennett // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. — 2007. — № 69. — P. 1211–1222.
20. Kleimenova N.G. Utrennie polyarnie subburi i variatsii atmosferного elektricheskogo polya [Morning polar substorms and atmospheric electric field variations] / N.G. Kleimenova, O.V. Kozireva, M. Kubitski [et al.] // Geomagnetizm i aeronomiya [Geomagnetism and Aeronomy]. — 2010. — Vol. 50. — № 1. — P. 51–60. [in Russian]
21. Kovalenko V.A. Sezonnie variatsii parametrov atmosferного elektrichestva i prizemnogo davleniya [Seasonal variations in atmospheric electricity and surface pressure parameters] / V.A. Kovalenko, Yu.V. Shamanskii, S.I. Molodikh // VI Rossiiskaya konferentsiya po atmosferному elektrichestvu [VI Russian Conference on Atmospheric Electricity]. — Nizhny Novgorod, 2007. — № 5. — P. 225–226. [in Russian]
22. Nie L. AEF anomalies before 2021 Yangbi earthquake. / L. Nie, X. Zhang // Atmosphere. — 2023. — № 14(10). — P. 1579.