Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 210–212.

УДК 550.388.2 533.951.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-2010
ORCID 0009-0005-6094-9829

ВЛИЯНИЕ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ЛОКАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

К.М. Васильев[1], Р.В. Васильев[1], А.В. Ойнац[1], К.Г. Ратовский[1], О.С. Зоркальцева[1], И.Д. Ткачёв[1]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, vasilevkm@iszf.irk.ru

INFLUENCE OF LIGHTNING ACTIVITY ON LOCAL PARAMETERS OF THE LOWER IONOSPHERE

K.M. Vasilev[1], R.V. Vasilyev[1], A.V. Oinats[1], K.G. Ratovsky[1], O.S. Zorkaltseva[1], I.D. Tkachev[1]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, vasilevkm@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе исследуется влияние грозовой активности на нижнюю ионосферу (D и E области) по многолетним данным вертикального зондирования и грозопеленгации в средних широтах. Использованы ряды параметров f_{min} и f_oE_s, полученные на ЛЧМ ионозонде (2012–2023 гг.,) и дигизонде DPS-4 (2012–2024 гг.,), совместно с данными о молниевых разрядах сетей «Верея-МР» (2012–2018 гг.) и локальной грозопеленгационной сети ИСЗФ СО РАН(2022–2025 гг.).

В летние дневные периоды с ростом числа молниевых разрядов в радиусе 80 км от ионозондов, выявлено снижение минимальной регистрируемой частоты f_{min} и плазменной частоты спорадического слоя f_oE_s, а также уменьшение количества регистраций слоя. В ночных условиях наблюдается увеличение дисперсии частотных параметров.

Предполагается, что в освещённой ионосфере усиление рекомбинационных процессов вызвано нагревом среды, вследствие диссипации энергии электромагнитного излучения молний. Вечерние и ночные вариации могут быть интерпретированы как результат увеличения концентрации ионосферной плазмы под действием высотных разрядов.

Ключевые слова: высотные разряды, нижняя ионосфера, ионозонд, грозопеленгационная сеть.

Abstract. The paper examines the influence of thunderstorm activity on the lower ionosphere (D and E regions) based on long-term data from vertical sounding and lightning direction finding in mid-latitudes. We used series of parameters $f_{min}$and f_oE_s obtained on the chirp ionosonde (2012–2023) and the DPS-4 digisonde (2012–2024), together with data on lightning discharges of the Vereya-MR networks (2012–2018) and local ISTP VLF lightning location network (2022–2025).

In summer daytime periods, with an increase in the number of lightning discharges within a radius of 80 km from the ionosondes, a decrease in the minimum recorded frequency and the plasma frequency of the sporadic layer f_oE_s was revealed, as well as a decrease in the number of registrations of the layer. At nighttime, an increase in the dispersion of frequency parameters is observed.

It is assumed that an increase in recombination processes in the illuminated ionosphere is caused by heating of the medium due to the dissipation of energy of electromagnetic radiation from lightning. Evening and nighttime variations can be interpreted as a result of an increase in the concentration of ionospheric plasma under the influence of high-altitude discharges.

Keywords: TLE, lower ionosphere, ionosonde, lightning location network.

ВВЕДЕНИЕ

Явления атмосферного электричества могут оказывать влияние на D область ионосферы через образование высотных разрядов на мезосферно-термосферных высотах. Под термином понимается класс кратковременных электродинамических явлений инициируемых в основном положительными облако-земля молниевыми разрядами [Евтушенко, 2023]. В англоязычных статьях принят термин Transient Luminous Events (TLE) - транзиентные световые явления. Форма, размеры и длины волн эмиссий заметно различаются у разных видов высотных разрядов.

Литературный обзор с исторической ретроспективой исследований явления высотных разрядов в атмосфере в результате воздействия атмосферного электричества приведен в работе [Franz и др., 1990], с неё же начинается период активного целенаправленного исследования данного явления. Основными актуальными обзорными работами, по многолетним наблюдениям являются: [Arnone и др., 2019] о результатах поздних кампаний EuroSprite с 2009 по 2013 год, миссия JEM-GLIMS длившаяся с 2012 по 2015 год на борту МКС [Sato и др., 2016], работа [Lin и др., 2026] резюмирующая данные 12 лет наблюдений высотных разрядов на спутнике FORMOSAT-2 с помощью оптических методов.

Отдельным направлением является моделирование высотных разрядов. Радиально-симметричная самосогласованная плазмохимическая модель спрайта представленная в работе [Евтушенко, 2023] приводит различные результаты воздействия спрайта на освещённую и не освещённую мезосферную плазму, а также воздействия на нейтральные компоненты, отрицательные ионы и электроны. Время релаксации возмущения концентрации электронов после спрайта в неосвещенной мезосфере изменяется с высотой от нескольких секунд на 75 км до 1000 с на 82 км, а радиус возмущения концентрации электронов растет с 10 км на высоте 75 км до 40 км на 79 км. Условия

для инициации спрайтов в освещённой мезосфере создаются в среднем на 20 км ниже, а диффузная область спрайта занимает диапазон высот от 56 до 64 км [Евтушенко, 2023]. Работа исследует влияние влияние атмосферного электричества на состояние нижней ионосферы по данным вертикального зондирования и грозопеленгации получаемых в ИСЗФ СО РАН.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ
ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННЫЕ СЕТИ

Общероссийская грозопеленгационная сеть Верея - МР действующая с 2012 по 2019 год [Московенко и др., 2012] была реализована для контроля энергетических сетей. На пике своего эксплуатационного периода система насчитывала 26 пунктов регистрации распределённых по территории России. Приёмник обеспечивал приём электрической компоненты и двух ортогональных магнитных компонент H_x, H_y электромагнитного поля молниевого разряда в диапазоне частот 1–50 кГц [Московенко и др., 2012]. Общий анализ данных для территории Иркутской области и Республики Бурятия проведён в работе [Ткачев и др., 2021]. Авторы приходят к выводу о схожести пространственно-временных характеристик грозовых очагов на Байкальской природной территории и территории РФ. В настоящей работе использованы архивные данные с 2012 по 2018 год.

Для продолжения наблюдения за молниевой активностью в регионе, в ИСЗФ СО РАН совместно со специалистами ИРНИТУ была разработана и с 2022 года введена в эксплуатацию локальная грозопеленгационная сеть ИСЗФ СО РАН. Она состоит из четырёх ОНЧ приёмников расположенных на территории Иркутской области и Республики Бурятия. Две ортогональные антенны ведут приём магнитных компонент в плоскости H_{NS} и H_{WE} в диапазоне до 50 кГц. Описание аппаратной, программной части сети и методов пеленгации координат молниевых разрядов и анализ первичных данных приведен в работе [Ткачев и др., 2025]. Один из приёмников расположен в непосредственной близости от ЛЧМ ионозонда описанного выше, на территории Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН. Особенностью системы, является наличие зоны с малым количеством регистрируемых молниевых разрядов вблизи пункта грозопеленгации. В настоящей работе использованы данные с 2022 по 2025 год.

Достаточная точность определения координат молниевых разрядов, позволяет использовать данные грозопеленгационных сетей для нахождения молниевых разрядов вблизи ионозондов.

ИОНОЗОНДЫ

В работе используются данные ЛЧМ ионозонда вертикального зондирования расположенного на территории Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.81 с. ш., 103.07 в. д.). Описание прибора дано в работе [Подлесный и др., 2013]. Определение параметров ионосферы производилась с помощью методики на основе автоматической интерпретации ионограмм вертикального зондирования ионосферы, представленной в работе [Пономарчук и Грозов, 2026]. В настоящей работе используются данные с 2012 по 2023 год с периодом в одну минуту.

На территории ИСЗФ СО РАН (51.24 с. ш., 104.26 в. д.) установлен цифровой ионозонд вертикального зондирования DPS-4, выпускаемый Центром атмосферных исследований (Массачусетский университет Лоуэлла, США). Описание прибора и принципов его работы приведено в работе [Ратовский и др., 2004]. Преобразование данных в таблицы, составляющее время и значение ионосферного параметра, проводилось оператором вручную с помощью программного комплекса SAO - Explorer. В настоящей работе используются данные с 2012 по 2024 год с периодом в 15 минут.

Для исключения в данных вертикального зондирования нерегулярных вариаций параметров ионосферы, были использованы данные индексов геомагнитной активности. Для каждой записи ионозондирования производилась фильтрация, в итоговом датасете данные при DST > -50 нТ, Kp < 3. Значения индексов представлены в открытом доступе по ссылке [OMNIWeb Data Explorer].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки влияния молниевых разрядов на данные вертикального зондирования ионосферы был выполнен анализ многолетних данных минимально регистрируемой плазменной частоты f_{min} и частоты спорадического слоя f_oE_sрисунок 1.

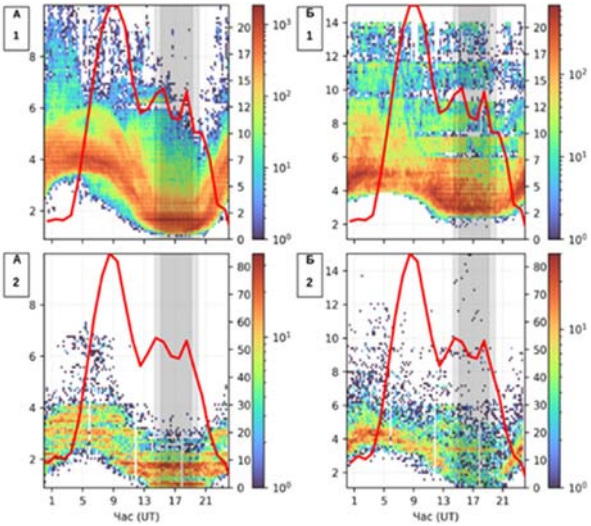

Рис. 1. Двумерная гистограмма распределения параметра f_{min} (А) и f_oE_s (Б) полученного на ЛЧМ (1) и DPS-4 (2) ионозонде вертикального зондирования ИСЗФ СО РАН в летние месяцы вблизи грозовой активности с 2012 по 2018 годы. Цветом показано количество данных для "X" значения в "Y" момент времени. Красной линией обозначено количество молниевых разрядов радиусе 80 км от представленного ионозонда полученных грозопеленгационной сетью Верея - МР (нормированое на 10^2). Серой заливкой обозначено время ионосферной ночи на высоте 100 км для первого и последнего суточного периода представленных данных

Во время нарастания активности молниевых разрядов вблизи ЛЧМ ионозонда (А1) в период с 5 до 13 UT наблюдается снижение параметра , что проявляется в виде облака точек (5 — 15 UT, 1 — 3 МГц) ниже характерного регулярного хода параметра, а также уменьшения количества записей с частотой >6 МГц после 5 UT. В данных DPS4 (А2) это проявляется в виде появления двухпиковой структуры статистического распределения параметра в аналогичный временной период суточного хода. Похожее поведение так же можно видеть для данных ЛЧМ ионозонда, динамика значений >минимальной частоты >4 МГц в это время суток требует отдельного исследования.

Динамика плазменной частоты спорадического слоя также претерпевает изменения при наступлении максимума молниевой активности. В секции Б2 заметно и снижение количество регистраций слоя в локальном максимуме грозовой активности и уменьшение характерных регистрируемых частот примерно с 7 до 13 UT. Аналогичный отклик можно увидеть и в секции Б2 с 5 до 13 UT.

Локальное вечернее и ночное время (13-21 UT) характеризуется значительным увеличением дисперсии наблюдаемых параметров и смещения среднего значения в область частот выше регулярного хода. Активность локальных гроз в вечерне-ночной период спадает приблизительно до половины дневного уровня, но количество молниевых разрядов держится стабильным до утра.

Авторами был проведен анализ аналогичных двумерных гистограмм для зимы и всего года, вышеописанные эффекты были наиболее ярко выражены в тёплый, конвективно активный сезон. Многолетняя динамика спорадических слоёв по данным ионозонда DPS4 с 2003 по 2021 год исследована в работе [Воронова и Ратовский, 2025).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние данные вертикального зондирования ионосферы позволяют сделать предположение о том, что снижение наблюдаемых плазменных частот f_o и f_oE_s в освещённой ионосфере может быть связано с увеличением рекомбинационных процессов в результате диссипации энергии электромагнитных волн молниевых разрядов. Также, моделирование проведённое в работе [Евтушенко, 2023] для дневных условий показывает, что инициация спрайта в дневных условиях возможна, однако требует значительно большей энергии молниевого разряда, а также будет происходить на 20 км ниже ночных условий. Образующаяся при этом плазма будет существенно обеднена электронами вследствие повышенного присоединения свободных электронов к нейтральным молекулам и образования отрицательных ионов. Такая плазма будет прозрачна для коротких радиоволн вследствие низких частот плазменных резонанасов.

В свою очередь, для неосвещённой ионосферы, в менее проводящей плазме на высотах D области, развитие высотных молниевых разрядов будет более вероятным [Haldoupis и др., 2013]. Воздействие таких высотных молниевых разрядов будет приводить к увеличению концентрации электронов [Евтушенко, 2023]. В данных вертикального зондирования это проявляется увеличением дисперсии наблюдаемых параметров плазмы спорадических слоёв спорадических слоёв (и минимальной наблюдаемой частоты и концентрации электронов) над регулярным ходом этих параметров в вечерне-ночное время..

Важно упомянуть возможный вклад вертикальной динамики высоты спорадического слоя $h'E_s$ на данные f_{min} и f_oE_s приведённые на рисунке 1. Требуется дополнительный анализ для определения связности вариаций этих параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воронова Е.А., Ратовский К.Г. Суточные вариации характеристик спорадического слоя над Иркутском // Солнечно-земная физика. 2025. Т. 11, № 1. С. 63–69.

Евтушенко А.А. Исследование условий инициации, особенностей развития и глобального распределения высотных разрядов в атмосфере. Нижний Новгород, 2023.

Московенко В.М., Знаменщиков Б.П., Золотарев С.В. Применение системы грозопеленгации «Верея-МР» в интересах электроэнергетики России // Новое в российской электроэнергетике. 2012. № 2. С. 15–23.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы. 2013.

Пономарчук С.Н., Грозов В.П. Методика автоматического определения параметров ионосферы по данным вертикального зондирования непрерывным ЛЧМ-сигналом // Солнечно-земная физика. 2026. Т. 12, № 1. С. 55–63.

Ратовский К.Г., Потехин А.П., Медведев А.В., Куркин В.И. Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности // Солнечно-земная физика. 2004. № 5. С. 102–104.

Ткачев И.Д., Васильев Р.В., Белоусова Е.П. Кластерный анализ молниевых разрядов по данным грозопеленгационной сети «Верея-МР» // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 4. С. 91–98.

Ткачев И.Д., Васильев Р.В., Зоркальцева О.С. и др. Экспериментальная распределенная сеть ОНЧ-приемников для мониторинга грозовой активности на Байкальской природной территории // Солнечно-земная физика. 2025. Т. 11, № 2. С. 112–123.

Arnone E., Bór J., Chanrion O., Barta V. Climatology of transient luminous events and lightning observed above Europe and the Mediterranean Sea // Surv. Geophys. 2019.

Franz R.C., Nemzek R.J., Winckler J.R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system // Science. 1990. V. 249, N 4964. P. 48–51.

Haldoupis, C., M. Cohen, E. Arnone, B. Cotts, S. Dietrich. The VLF fingerprint of elves: Step-like and long-recovery early VLF perturbations caused by powerful ±CG lightning EM pulses // J. Geophys. Res. Space Physics. 2013. V. 118, P. 5392–5402.

Lin Y.C., Chen A.B., Chuang C.W., Su H.T., Hsu R.R. Global distribution and seasonal variation of transient luminous events observed by ISUAL over 12 years // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2026. V. 131, N 2.

Sato M., Mihara M., Adachi T., et al. Horizontal distributions of sprites derived from the JEM-GLIMS nadir observations // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2016. V. 121, N 7. P. 3171–3194.

OMNIWeb Data Explorer. URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html (дата обращения 31.05.2026).