

СРАВНЕНИЕ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ О ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

COMPARISON OF GROUND-BASED AND SATELLITE DATA ON SPATIOTEMPORAL DISTRIBUTION OF LIGHTNING DISCHARGES UNDER SOLAR MINIMUM

В.В. Денисенко

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Красноярск, Россия, denisen@icm.krasn.ru*

А.Н. Ляхов

*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН,
Москва, Россия, alyakhov@idg.chph.ras.ru*

V.V. Denisenko

*Institute of Computational Modelling RAS SB,
Krasnoyarsk, Russia, denisen@icm.krasn.ru*

A.N. Lyakhov

*Sadovsky Institute of geosphere dynamics RAS,
Moscow, Russia, alyakhov@idg.chph.ras.ru*

Аннотация. На основе данных наземной Всемирной сети определения местоположения молний (WWLLN) за 2007–2009 гг. были построены глобальные карты грозовой активности. Мы создали такие карты для разных сезонов и периодов универсального времени, используя данные WWLLN о времени и координатах каждой из зафиксированных молний. Общее количество молний в данных WWLLN на порядок меньше, чем в спутниковых данных системы OTD/LIS. Тем не менее ключевые особенности пространственного распределения и сезонные тенденции, полученные наземными и спутниковыми методами, находятся в удовлетворительном соответствии. Основное различие заключается в отсутствии суточных вариаций, аналогичных кривой Карнеги, в данных WWLLN при их наличии в спутниковых данных. Это касается количества молний как на всей Земле, так и отдельно в основных грозовых областях. Зависимость от местного времени в данных WWLLN также выражена слабее. Мы показали, что в 2007–2009 гг. средняя широта обнаружения молний смещается в летнее полушарие на величину до 10° от среднегодового значения. В период с начала 2007 до конца 2009 г. среднемесячное число молний в мире по данным WWLLN увеличилось в три раза. Мы объясняем этот факт в первую очередь совершенствованием методов наблюдения в системе WWLLN. Построенные карты необходимы для численного моделирования глобальной электрической цепи.

Ключевые слова: атмосфера, грозовая активность, глобальное распределение, сезонная зависимость, суточные вариации.

Abstract. Worldwide maps of lightning activity have been obtained from the ground-based World Wide Lightning Location Network (WWLLN) for 2007–2009. We have compiled these maps separately for different seasons and UT periods, using WWLLN data on the time and coordinates of each of the recorded lightning. The total number of flashes of lightning in WWLLN data is by an order of magnitude smaller than in satellite data from Optical Transient Detector and the Lightning Imaging Sensor satellites. However, the key features of the spatial distribution and seasonal trends coincide well. The main difference observed is the absence of diurnal variation (similar to Carnegie curve) in WWLLN data against the satellite one. This concerns the global lightning number as well as its density in major thunderstorm regions. The solar local time dependence is also weak in WWLLN data. We show that in 2007–2009 the mean latitude of lightning observation is shifted to the summer hemisphere up to 10° from the annual mean value. From the beginning of 2007 to the end of 2009, the global monthly average number of flashes of lightning increased threefold. We attribute this fact primarily to improved processing techniques in WWLLN. The constructed maps are necessary for numerical simulation of the Global Electric Circuit.

Keywords: atmosphere, thunderstorm activity, global distribution, seasonal dependence, daily variation.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие растет интерес к исследованию процессов в глобальной электрической цепи (ГЭЦ). С нашей точки зрения, такое пристальное внимание обуславливается уникальными свойствами ГЭЦ, связывающей различные геосферы и физические процессы с разными пространственно-временными масштабами. Глобальное изменение

климата связано с грозовой активностью [Williams, 2005] через изменение числа мезомасштабных конвективных систем, которые, в свою очередь, отвечают за высокий уровень грозовой активности. Более того, ГЭЦ может представлять ядро физического механизма, ответственного за связь между солнечной активностью и метеорологическими и климатическими процессами [Rycroft et al., 2000; Tinsley, 2000].

Предложенные новые физические механизмы влияния ГЭЦ на глобальные процессы в атмосфере требуют надежной проверки. Использование исключительно корреляционного анализа никогда не будет свободно от проблемы скрытых параметров, претензий к объему наблюдательных данных и фундаментальной проблемы выдвижения и статистической проверки физической гипотезы с использованием одних и тех же данных [Analysis of Climate Variability, 1999]. Следовательно, необходимы численные модели ГЭЦ, позволяющие количественно верифицировать вклад тех или иных физических процессов.

Необходимым входным параметром для любой численной модели ГЭЦ является эмпирическая модель пространственно-временного распределения молниевых разрядов по Земле. Эта первичная модель конвертируется в рамках определенных физических предположений в распределение атмосферного тока проводимости. На текущем этапе развития теоретических моделей пространственно-временными вариациями тока смещения в атмосфере пренебрегают, хотя они могут быть значительными при импульсных возмущениях диэлектрической проницаемости среды.

Для анализа была выбрана общедоступная база данных, которая содержит время и координаты всех молний, зарегистрированных сетью наземных обсерваторий WWLLN (World Wide Lightning Location Network). Основные характеристики этих данных описаны в работе [Rodger et al., 2004], подробности приведены на сайте [<https://wwlln.net>].

Мы построили карты глобальной активности молнии, которые позволяют количественно оценить глобальное распределение полного электрического тока в ГЭЦ. Эти карты задают входные данные, необходимые для численных моделей ГЭЦ.

1. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ МОЛНИЙ ОБЛАКО—ЗЕМЛЯ

На рис. 1 показана интенсивность молний в 2007–2009 гг. (верхняя панель) с усредненным по дням индексом солнечной активности $F10.7$ (средняя панель) и индексом геомагнитной активности A_p (нижняя панель). На рис. 1 общее количество молний в течение каждого дня было разделено на 86400 с. Главной видимой особенностью является увеличение интенсивности грозных разрядов с 1.5 в секунду в 2007 г. до 4.5 в секунду к концу 2009 г. Эта тенденция не может быть объяснена влиянием солнечной или геомагнитной активности. Более того, в 2009 г. не было ни солнечных вспышек, ни корональных выбросов массы: наблюдался абсолютный минимум солнечной активности. Это увеличение можно объяснить существенными улучшениями в обработке данных WWLLN, которые произошли в феврале 2008 г. и в апреле 2009 г. В то же время нельзя исключить кратковременные метеорологические изменения грозной активности.

В статье [Blakeslee et al., 2014] представлено многолетнее среднее число молний по оптическим данным спутниковой системы наблюдений OTD/LIS (Optical Transient Detector and the Lightning Imaging Sensor satellites). Эти приборы показывают примерно

50 разрядов в секунду, что в 20 раз больше, чем 2.6 разрядов в секунду по данным WWLLN за 2007–2009 гг. Этот факт можно объяснить чувствительностью приборов и техникой регистрации. Аналогичное соотношение получено в статье [Mezuman et al., 2014], где показано, что система WWLLN регистрирует только 11 % молний облако—земля, хотя эта доля возрастает до 30 % для разрядов с большими токами. Система OTD/LIS эффективно удаляет фоновое оптическое излучение и может обнаруживать до 90 % молний всех типов (облако—земля и облако—облако). Заметим, что спутник наблюдает только область 1300×1300 км², в то время как система WWLLN действительно глобальна. Однако в WWLLN используется специальный алгоритм обработки записей электромагнитных импульсов молниевых разрядов, который не способен обработать/учесть внутриоблачные разряды. К тому же правило принятия решения требует, чтобы по крайней мере пять станций независимо зарегистрировали одну и ту же вспышку, следовательно, количество обнаруженных молний может дополнительно уменьшаться, что является недостатком WWLLN. Однако при описании долгосрочной динамики это не принципиально, поскольку сводится к изменению масштаба по вертикальной оси на рис. 1. Глобальный охват WWLLN устраняет проблему асиноптической регистрации молний, характерную для OTD/LIS. Асиноптическая регистрация спутниковыми системами означает отсутствие повторяющихся наблюдений в одной и той же точке пространства (широта—долгота), зачастую за весь период работы спутника. Salby [1982a, b] показал, что непосредственная интерполяция и усреднение спутниковых данных могут привести к ошибочным пространственно-временным полям. С нашей точки зрения, ограниченность в пространстве и времени спутникового кадра OTD/LIS уравнивает более низкую чувствительность WWLLN при оценке числа разрядов.

На рис. 2 представлены глобальные среднегодовые карты для этих двух систем [Kaplan, Lau, 2019; Cecil, 2015]. Очевидно, что спутниковая система недооценивает количество молний в Азиатско-Тихоокеанском регионе, а также над океанами и переоценивает количество молний над Южной Америкой.

Корректный ввод пространственно-временного распределения источников тока в численную модель ГЭЦ может быть сведен к анализу распределения молний (см. раздел 4). Это требует глобального охвата; таким образом, рис. 2 позволяет нам рассматривать данные WWLLN как более подходящие для моделирования ГЭЦ. Что касается сопоставления распределений молний в пространстве и времени, мы сравниваем наши данные с данными [Blakeslee et al., 2014], разделив последние на 20 для единообразного представления на рисунках.

2. СЕЗОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОБЩЕМИРОВОГО ЧИСЛА МОЛНИЙ

На рис. 3–6 представлены глобальные карты плотности молний за четыре сезона, их названия соответствуют Северному полушарию. Количество молний за сезон просуммировано по ячейкам $5^\circ \times 5^\circ$,

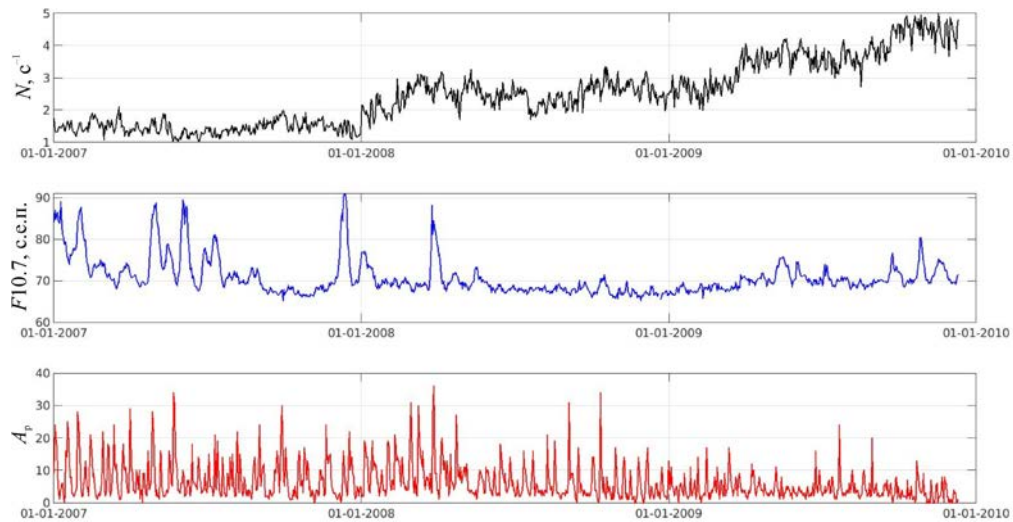


Рис. 1. Глобальная интенсивность молний в 2007–2009 гг. (верхняя панель), индекс солнечной активности $F10.7$ (средняя панель) и индекс геомагнитной активности A_p (нижняя панель)

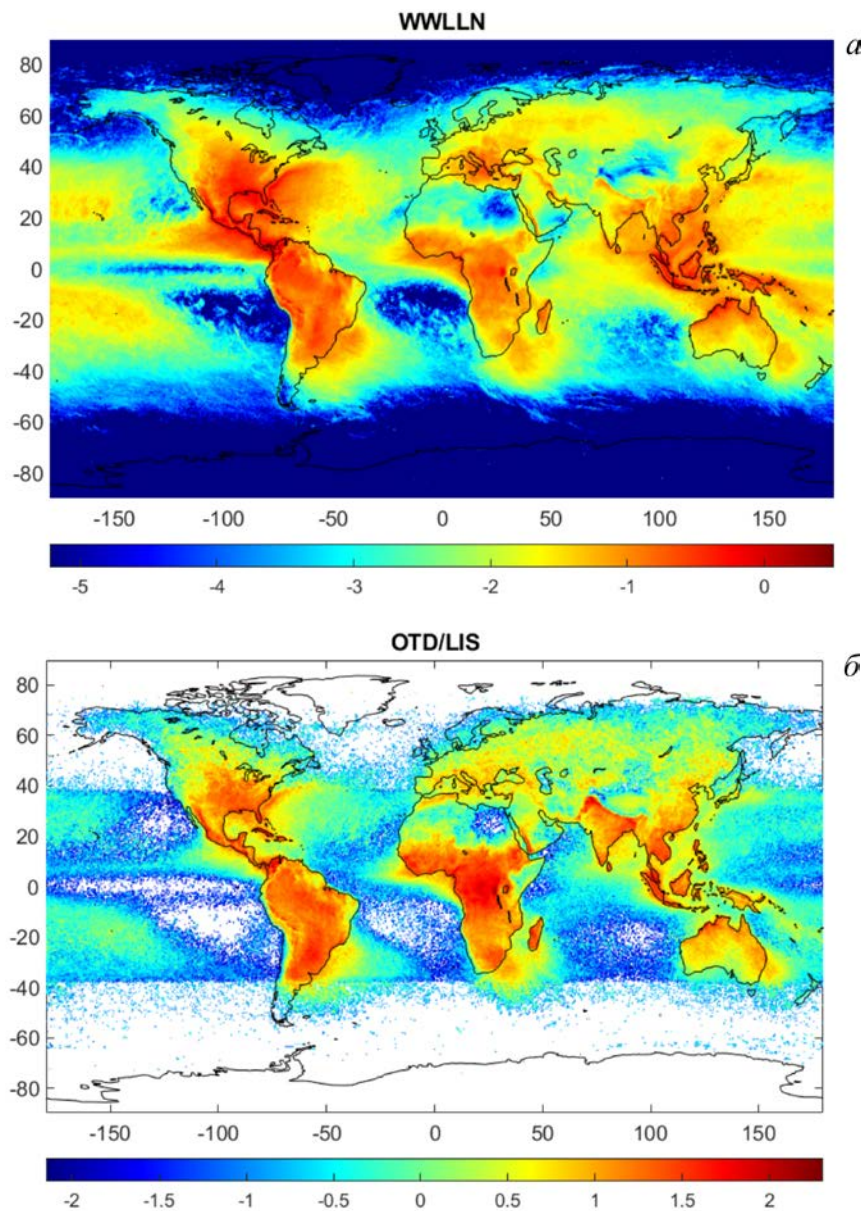


Рис. 2. Десятичный логарифм среднегодовой плотности молний в единицах $1/(\text{км}^2\text{год})$, зарегистрированных наземной системой WWLLN (а) и космической системой TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) OTD/LIS (б)

затем разделено на площади ячеек $[\text{км}^2]$ и на длительность анализируемого сезона $[\text{с}]$. Результат в единицах $1/(\text{с км}^2)$ отнесен к центрам ячеек. Точность определения местоположения молнии составляла 1 км, а точность определения времени — 0.1 с.

Естественно, грозовая активность выше в низких широтах и отсутствует в высоких широтах. Согласно выбранной цветовой шкале, молнии практически отсутствуют на широтах выше 60° , поэтому эти области не показаны.

На рис. 7 показано изменение среднего значения широты, на которой наблюдаются молнии в течение года. Среднеквадратичные отклонения (СКО) показаны вертикальными отрезками. СКО на рис. 7 были рассчитаны при рассмотрении среднесуточной широты в качестве случайной величины. Если мы рассмотрим как случайную величину координату каждой конкретной молнии, то среднее значение широты останется прежним, а СКО увеличится на порядок. Это объясняется значительным диапазоном широт, превышающим десятки градусов. Такой разброс виден на картах интенсивности (рис. 3–6). Напомним, что на рис. 3–6 представлены распределения, усредненные по сезонам.

Кривые на рис. 7 приведены как для всей Земли, так и для трех основных грозовых областей. Последние взяты как секторы (Америка, Африка и Азия, включая океаны), разделенные меридианами с долготами 140° W , 30° W и 60° E . Сдвиг грозовой активности в Северное полушарие ярко виден и статистически значим. Во всех секторах средняя широта также смещена на 10° от среднегодового значения в летнее полушарие.

3. СУТОЧНЫЙ ХОД ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

Зависимость грозовой активности от универсального времени (UT) представляет особый интерес для теории ГЭЦ, поскольку эта зависимость частично объясняет кривую Карнеги [Mach et al., 2011]. На рис. 8 представлены наблюдаемые интенсивности гроз (количество молний в секунду) с СКО для трех вышеупомянутых секторов и для Земли в целом в зависимости от UT. Исходные данные были

усреднены по часам в 2008 г. и отнесены к середине часа. СКО вычислены по средним интенсивностям за каждый час. Таким образом, любая определенная точка с СКО на рис. 8 и 10 была получена для набора из 366 чисел, в то время как для рис. 9 было использовано 92 числа.

Линии без указания разброса взяты из [Blakeslee et al., 2014] с уменьшением масштаба в 20 раз. Поскольку количество молний в Европе намного меньше, чем в Африке, разница между африканскими кривыми (нашей для сектора, включающего Африку и Европу, и взятыми из [Blakeslee et al., 2014]) должна быть незначительной. Тем не менее, разница очевидна, и это показывает, что расхождение между спутниковыми и наземными данными об активности молний в Африке значительно. Результаты за 2007 и 2009 гг. различаются незначительно. Для Земли в целом разница в зависимости от UT так же значительна, как и для среднегодовой грозовой активности (см. рис. 2).

В наземных данных в 12–24 UT по сравнению с 00–12 UT не наблюдается значительного (до 1.5 раз) увеличения, аналогичного кривой Карнеги [Harrison, 2013]. Несмотря на значительное изменение количества молний (1.5 , 2.6 и 3.8 с^{-1} в 2007, 2008 и 2009 гг. соответственно), результаты за 2007 и 2009 гг. также не обладают упомянутым свойством. Суточные изменения происходят из-за других секторов. В Африке изменение числа молний в 2007–2009 гг. было очень слабым.

В других секторах суточный ход, полученный по данным WWLLN, также выражен слабее, чем полученный по данным OTD/LIS: в Азиатско-Тихоокеанском регионе рост составил всего 1.5 раза вместо 4, в Америке — 1.8 раза вместо 6.

На рис. 9 представлена интенсивность молний в течение дня отдельно для летних месяцев. Сравнение рис. 8 и 9 демонстрирует, что отличия наземных данных WWLLN от спутниковых данных OTD/LIS не связаны с усреднением по годам, и они видны для каждого сезона.

На рис. 10 приведены те же данные, что и на рис. 8, но в зависимости от местного солнечного времени (LT). Локальный максимум для данных как WWLLN, так и OTD/LIS приходится на 15–18 LT. Хорошо

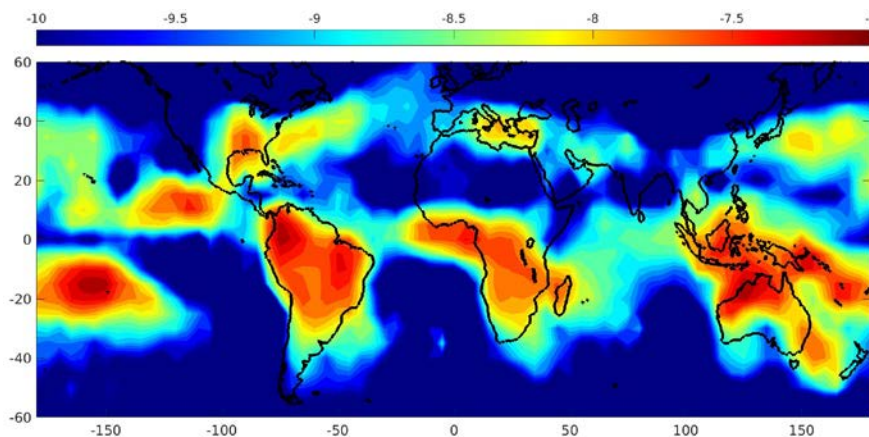


Рис. 3. Глобальное распределение плотности молний в январе и феврале 2009 г. Используется логарифмическая шкала для плотности в единицах $1/(\text{с км}^2)$

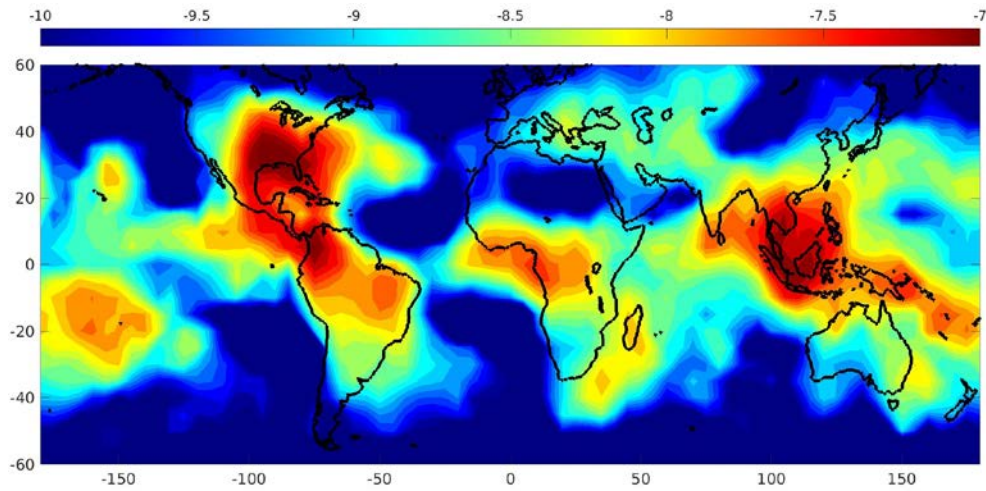


Рис. 4. Глобальное распределение плотности молний в марте–мае 2009 г.

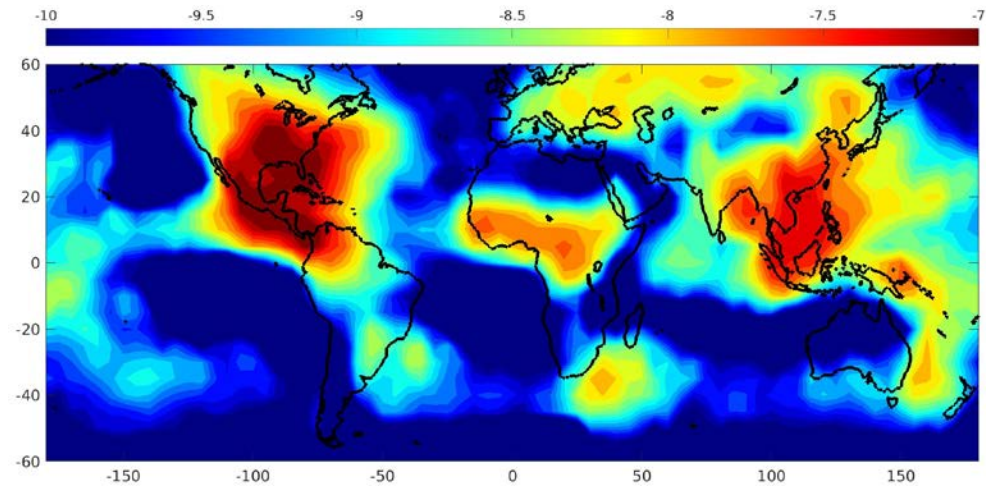


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для июня–августа 2009 г.

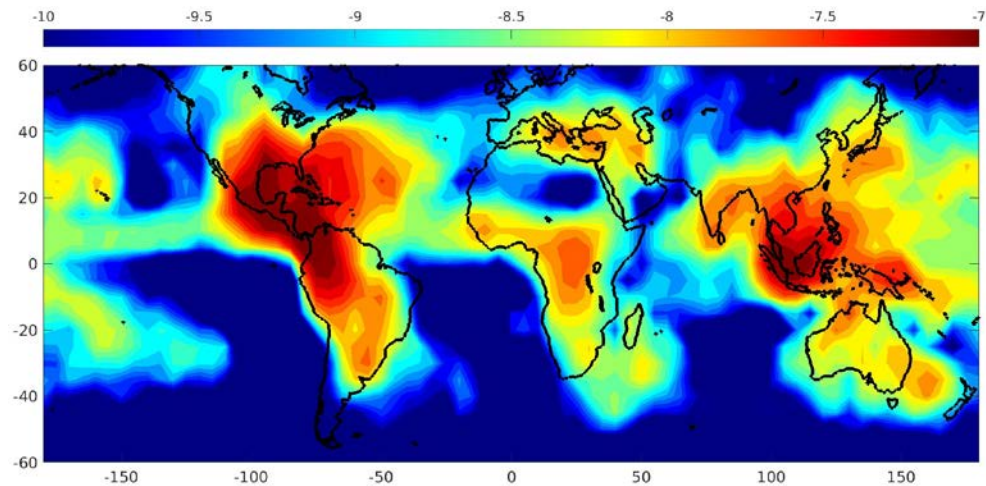


Рис. 6. То же, что на рис. 4, для сентября–ноября 2009 г.

известно, что 15–18 LT — время максимального нагрева поверхности и тропосферы. Как и для UT (рис. 8), максимум в данных WWLLN меньше, чем в данных OTD/LIS (рис. 10): среднесуточное количество молний в секунду для всей Земли изменяется в 2 раза вместо 6, изменение для Африки составляет 2.5 раза вместо 11.

Фактически рис. 8, 9 демонстрируют отсутствие корреляции количества молний, зарегистрирован-

ных WWLLN на всей Земле, с кривой Карнеги. Аналогичный результат был получен в работе [Mezuman et al., 2014] при усреднении за семилетний период с 2006 по 2012 г. В той же статье было предложено рассматривать не количество отдельных молний, а количество кластеров, которые, если не вдаваться в детали, определены как ячейки $1 \times 1^\circ$, в которых зарегистрировано не менее 10 молний за час. Было показано, что суточный ход количества кластеров

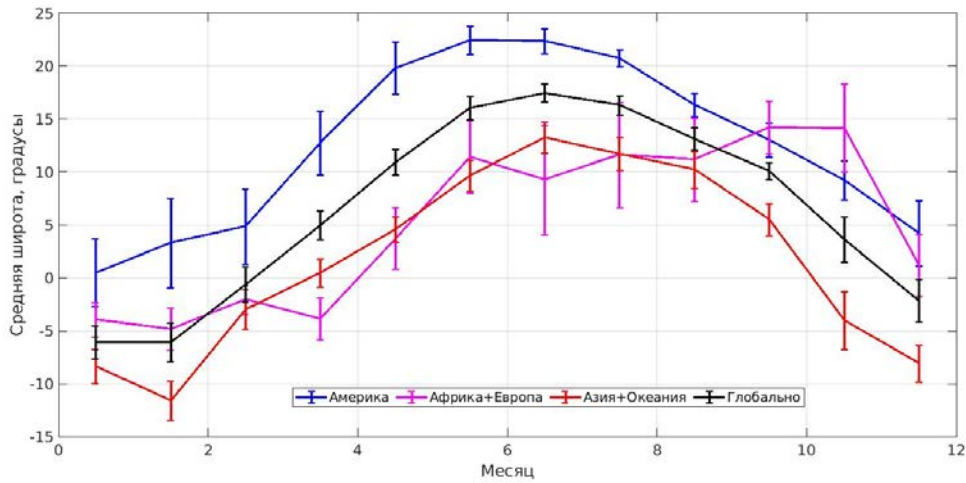


Рис. 7. Среднемесячная широта обнаружения молний в 2008 г.

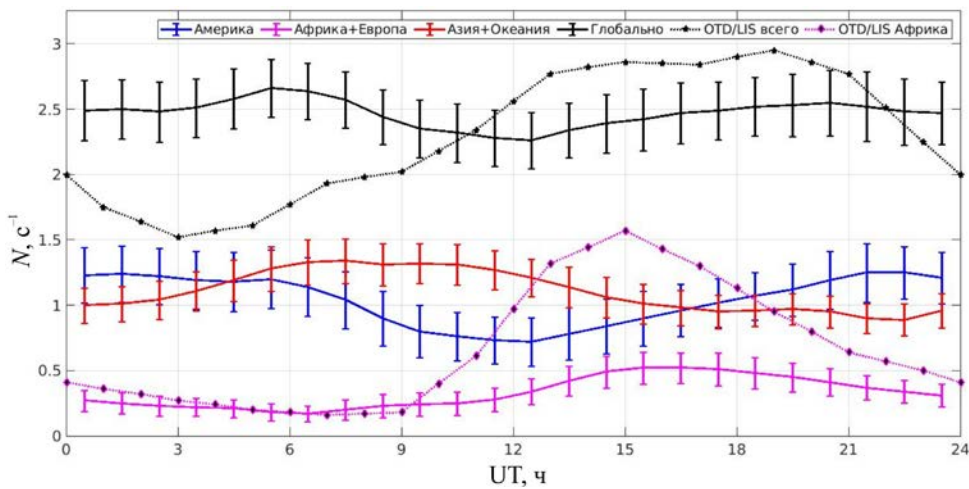


Рис. 8. Среднесуточное количество молний в секунду в 2008 г. Данные OTD/LIS, взятые из [Blakeslee et al., 2014], уменьшены в 20 раз

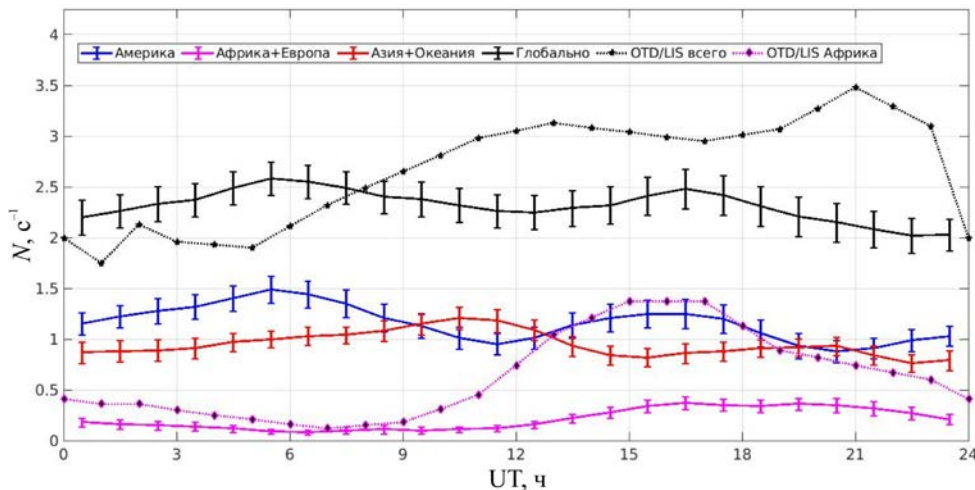


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, только для летних месяцев

близок к кривой Карнеги и коэффициент корреляции достигает 0.95.

Этот метод был развит в работе [Ссора et al., 2021] и применен для анализа данных за 2012 и 2013 гг. Суточный ход количества кластеров стал еще ближе к кривой Карнеги. Например, для осеннего периода (сентябрь—ноябрь) полученный в [Ссора et al., 2021] коэффициент корреляции

возрос до 0.99. По-видимому, это связано с удачным определением кластеров (объединение соседних ячеек размером $0.1 \times 0.1^\circ$, в каждой из которых зарегистрировано не менее одной молнии за час).

Представляется необходимым развитие анализа грозовой активности в различные годы солнечных циклов.

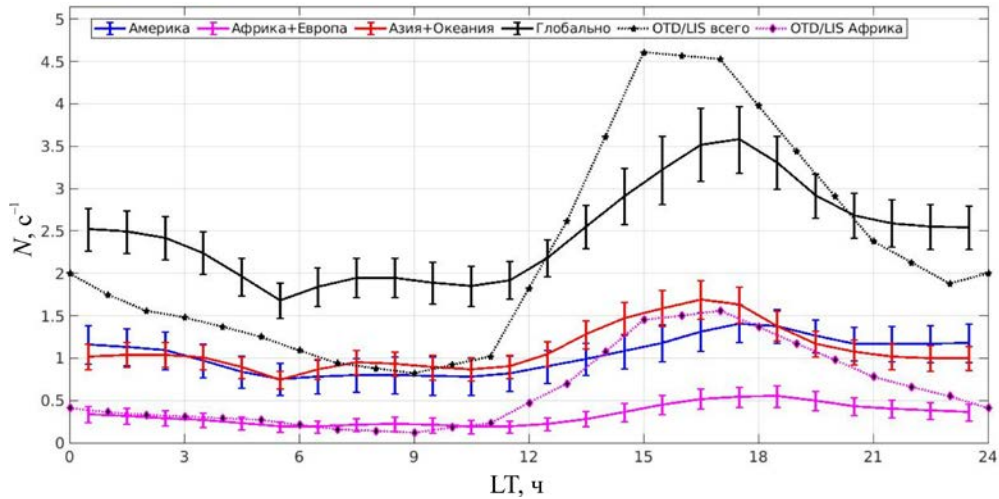


Рис. 10. То же, что и на рис. 8, но в зависимости от солнечного местного времени

4. ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОСТРОЕННЫХ КАРТ В МОДЕЛЯХ ГЭЦ

Основным генератором ГЭЦ является совокупность всех гроз на Земле [Мареев, 2010]. Их ключевым параметром является суммарный ток, уходящий в ионосферу. К сожалению, нет способа измерения этого тока, поэтому приходится использовать процедуру, описанную ниже [Denisenko et al., 2019a, b].

Сначала измеряется электрическое поле вблизи поверхности Земли при хороших погодных условиях. Это поле E_0 направлено вниз и имеет только z -компоненту из-за большой проводимости грунта по сравнению с проводимостью атмосферы $\sigma(0)$. Из закона Ома получается вертикальная плотность тока проводимости вблизи поверхности: $j_0 = -\sigma(0)E_0$. При отсутствии источников заряда в атмосфере плотность тока не меняется с высотой. Последнее утверждение верно, если мы рассматриваем стационарный случай, пространственный масштаб явления превышает десятки километров и мы пренебрегаем кривизной Земли.

Далее, используя измеренный профиль проводимости атмосферы $\sigma(h)$ (до высоты 30 км), мы получаем напряженность электрического поля:

$$E(h) = \frac{j_0}{\sigma(h)} = E_0 \frac{\sigma(0)}{\sigma(h)}.$$

Интегрирование электрического поля между поверхностью Земли и ионосферой дает разность потенциалов:

$$U_0 = -\int_0^H E(h)dh = -E_0 \int_0^H \frac{\sigma(0)}{\sigma(h)} dh.$$

Верхний предел интегрирования H — это высота ионосферы, и его можно определить только приблизительно, но это несущественно, поскольку менее 1% значения интеграла набирается выше 30 км из-за быстрого увеличения $\sigma(h)$ с высотой (см. рис. 5 в статье [Denisenko et al., 2019a]). Из напряжения U_0 (это также потенциал ионосферы при нулевом потенциале на земле) и пространственного распределе-

ния проводимости атмосферы мы получаем плотность тока вблизи поверхности Земли:

$$j(\lambda, \varphi) = \frac{U_0}{\Sigma(\lambda, \varphi)}.$$

Здесь λ, φ — долгота и широта, а проводимость столба воздуха площадью 1 м^2 $\Sigma(\lambda, \varphi)$ может быть найдена путем интегрирования от поверхности до ионосферы:

$$\frac{1}{\Sigma(\lambda, \varphi)} = \int_0^H \frac{1}{\sigma(\lambda, \varphi, h)} dh.$$

Наконец, интегрированием по всей Земле получаем суммарный ток из ионосферы $I_0 = U_0 / R$, где суммарное сопротивление атмосферы R можно найти как

$$\frac{1}{R} = \int \Sigma(\lambda, \varphi) R_E^2 \cos \lambda d\lambda d\varphi,$$

где R_E — радиус Земли.

Для сохранения заряда в стационарных условиях требуется такой же ток из грозовых областей в ионосферу $I = I_0$. Распределение грозового тока по Земле остается неизвестным. Мы предполагаем, что ток в ионосферу и количество молний пропорциональны какому-то скрытому параметру, характеризующему грозовую активность. Таким образом, мы используем глобальное распределение плотности молний для косвенного определения грозового тока, полагая количество молний и ток линейно зависимыми. В [Mach et al., 2011] приведены коэффициенты такой пропорциональности для грозовых разрядов различных типов отдельно для суши и океана. Меньшее количество молний в данных WWLLN должно изменить эти коэффициенты, но мы здесь и не рассматриваем саму модель ГЭЦ. В конце следующего раздела описан возможный переход от количества молний к количеству грозовых кластеров [Mezuman et al., 2014] и выбор зависящих от времени суток коэффициентов пропорциональности.

В ток, уходящий из атмосферы в ионосферу, наряду с грозовыми источниками вносят вклад и негрозовые облака, которые тоже могут обладать развитой электрической структурой [Мареев, 2010].

По оценке [Blakeslee et al., 2014], их вклад достигает 17 %. Заметим, что величину этого вклада трудно согласовать с обсуждавшейся в предыдущем разделе высокой корреляцией суточного хода количества грозовых кластеров с кривой Карнеги. Полученные в работе [Ссора et al., 2021] коэффициенты корреляции, достигающие осенью 0.99, не оставляют места негрозовым облакам или требуют, чтобы они имели точно такую же UT-зависимость, что и грозовые.

5. СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МОДЕЛЯМИ

На рис. 11 представлена глобальная карта плотности молний летом 2009 г. в 18–20 UT. Выбор двух часов около 19:00 UT отличает рис. 11 от рис. 5, построенного для полных суток всех летних месяцев. В известной работе [Hays, Roble, 1979] также представлена модель грозовой активности для 19:00 UT в июле. Ранее она использовалась при моделировании ионосферной части ГЭЦ в [Denisenko et al., 2019a, b]. В настоящем анализе мы используем сформулированное выше предположение о линейной зависимости между количеством молний и электрическим током из атмосферы в ионосферу. Электрический ток из атмосферы в ионосферу в 19:00 UT в трех вышеупомянутых секторах составляет около 45, 15 и 40 % от общего тока соответственно (см. рис. 10). В модели [Hays, Roble, 1979] эти доли составляют 65, 30 и 5 % соответственно. Таким образом, основное различие заключается в десятикратной недооценке грозовой активности в Азии (5 % вместо 40 %). Во втором секторе мы объединяем Европу и Африку. На рис. 11 видно, что токи над Европой не в 30 раз меньше, чем над Африкой (20 А и 600 А в модели [Hays, Roble, 1979]). Токи в других грозовых зонах близки к нашим результатам. Грозовые области имеют сложную форму с относительно небольшими токами в некоторых местах.

Увеличение тока в ионосферу над Азией, которая находится в ночных условиях в 19:00 UT, и над Европой, по которой проходит терминатор, приведет к значительному увеличению разности потенциалов в ионосфере.

Разность потенциалов между землей и ионосферой не зависит от географического распределения гроз. Ключевым параметром является суммарный ток в ионосферу (см. предыдущий раздел).

Глобальные карты грозовой активности (см. рис. 3–6) качественно совпадают с данными [Blakeslee et al., 2014], полученными на основе спутниковых данных, включая летний сдвиг в Северное полушарие и приблизительное расположение основных грозовых областей. Это справедливо для всех сезонов.

Существенные различия также видны. Уже упомянутая трехкратная разница в полном токе в африканском секторе (см. рис. 9) существует при примерно одинаковых пространственных распределениях (см. рис. 5). В то же время для азиатского сектора наш рис. 5 демонстрирует сдвиг грозовой области на восток по сравнению с рис. 11 из [Blakeslee et al., 2014] (летний фрагмент). Видны также меньшие токи над Южной Америкой.

Относительная гладкость наших распределений объясняется следующим. На рис. 11 в [Blakeslee et

al., 2014] использовалось усреднение по ячейкам $0.5 \times 0.5^\circ$. На нашем рисунке использовалась более грубая сетка $5 \times 5^\circ$ с дальнейшим рисованием с помощью системы MATLAB. Наш подход кажется предпочтительным для визуализации крупномасштабных структур.

Как уже отмечалось, построенные нами рис. 8, 9 демонстрируют отсутствие корреляции количества молний, зарегистрированных WWLLN на всей Земле, с кривой Карнеги, а в работах [Mezuman et al., 2014; Ссора et al., 2021] удалось достичь соответствия данных WWLLN кривой Карнеги за счет перехода от количества отдельных молний к количеству кластеров. Это говорит о целесообразности кластеризации молниевых разрядов для определения количества гроз с дальнейшим использованием полученного количества гроз для построения плотности грозового тока из атмосферы в ионосферу. Следует отметить, что при анализе спутниковых данных OTD/LIS [Blakeslee et al., 2014] переход от отдельных молний к грозовым кластерам не понадобился.

Если использовать кривую Карнеги как критерий истины, при переходе к плотности тока в ионосферу наши результаты можно нормировать в соответствии с ней, т. е. получаемые для отдельных часов глобальные распределения плотности молний, аналогичные представленным на рис. 3–6, умножать не на единое число, а на свое для каждого часа. При этом остается вопрос, не затронутый в работах [Mezuman et al., 2014; Ссора et al., 2021], насколько переход к кластерам изменяет пространственное распределение. Естественно, основные грозовые области на рис. 3–6 соответствуют результатам, полученным как по наземным измерениям WWLLN [Mezuman et al., 2014; Ссора et al., 2021], так и по спутниковым данным OTD/LIS [Blakeslee et al., 2014]. Это позволяет использовать построенные карты в качестве приближенных распределений плотности грозового тока из атмосферы в ионосферу при моделировании ГЭЦ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данных WWLLN отсутствует суточная зависимость, аналогичная кривой Карнеги, присутствующая в спутниковых данных OTD/LIS как для всей Земли, так и для основных грозовых областей. Зависимость от местного времени в данных WWLLN слабая. Средняя широта наблюдения молний была смещена в летнее полушарие в 2007–2008 гг. Общее количество молний в данных WWLLN с начала 2007 г. к концу 2009 г. увеличилось втрое.

Дальнейшее исследование должно включать последний солнечный цикл; кроме того, следует дополнить данные WWLLN данными о параметрах резонатора Шумана (частота, амплитуда и коэффициент качества). Эти параметры фиксируются на геофизической станции «Михнево» Института динамики геосфер им. Садовского с 2015 г. [Poklad et al., 2018, 2019].

Целесообразно при построении пространственных распределений плотности грозового тока в ионосферу по данным WWLLN перейти от рассмотрения количества отдельных молний к количеству кластеров, как сделано в работах [Mezuman et al., 2014; Ссора et al., 2021].

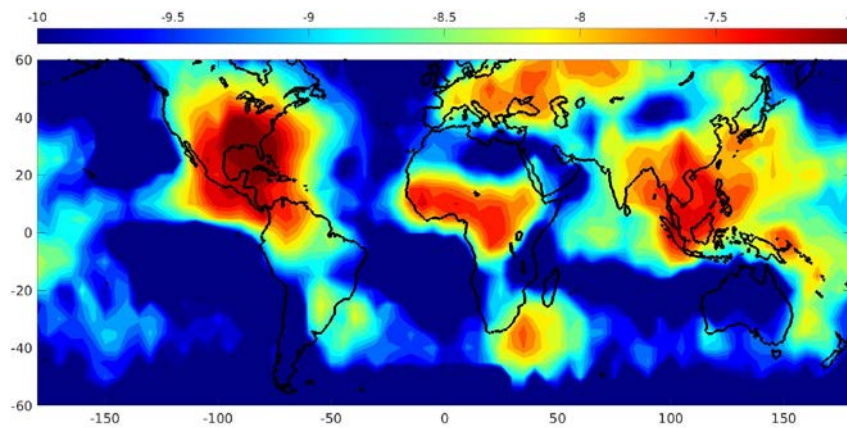


Рис. 11. Глобальная карта плотности молний летом 2009 г. в период 18:00–20:00 UT

Авторы благодарят команду Всемирной сети определения местоположения молний [<https://wwlln.net>], данные которой использованы в этой статье.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2021-1384).

Эта работа в части анализа пространственно-временных характеристик грозовой активности поддержана государственным контрактом АААА-А19-119028790056-6.

Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить наш текст.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи. *УФН*. 2010. Т. 180. С. 527–534. DOI: [10.3367/UFNr.0180.201005h.0527](https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201005h.0527).

Analysis of Climate Variability. Eds H. von Storch, A. Navarra. Springer-Verlag, 1999. 342 p. DOI: [10.1007/978-3-662-03744-7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03744-7).

Blakeslee R.J., Mach D.M., Bateman M.G., Bailey J.C. Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit. *Atmos. Res.* 2014. Vol. 135–136. P. 228–243. DOI: [10.1016/j.atmosres.2012.09.023](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.023).

Cecil D.J. *LIS/OTD Gridded Lightning Climatology Data Collection. Version 2.3.2015. HRF_COM_FR*. 2015. DOI: [10.5067/LIS/LIS-OTD/DATA311](https://doi.org/10.5067/LIS/LIS-OTD/DATA311).

Скопа J.G.A., Tacza J., Raulin J.-P., Morales C.A. Estimation of thunderstorms occurrence from lightning cluster recorded by WWLLN and its comparison with the “universal” Carnegie curve. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2021. Vol. 221, 105682. DOI: [10.1016/j.jastp.2021.105682](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105682).

Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G. Mathematical simulation of the ionospheric electric field as a part of the Global Electric Circuit. *Surveys in Geophys.* 2019a. Vol. 40. P. 1–35. DOI: [10.1007/s10712-018-9499-6](https://doi.org/10.1007/s10712-018-9499-6).

Harrison R.G. The Carnegie Curve. *Surveys in Geophys.* 2013. Vol. 34. P. 209–232. DOI: [10.1007/s10712-012-9210-2](https://doi.org/10.1007/s10712-012-9210-2).

Hays P.B., Roble R.G. A quasi-static model of global atmospheric electricity. 1. The lower atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84, no. A7. P. 3291–3305. DOI: [10.1029/JA084iA12p07247](https://doi.org/10.1029/JA084iA12p07247).

Kaplan J.O., Lau H.-K.K. The WGLC global gridded monthly lightning stroke density and climatology. *PANGAEA*. 2019. DOI: [10.1594/PANGAEA.904253](https://doi.org/10.1594/PANGAEA.904253).

Mach D.M., Blakeslee R.J., Bateman M.G. Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics.

J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116, D05201. DOI: [10.1029/2010JD014462](https://doi.org/10.1029/2010JD014462).

Mezuman K., Price C., Galanti E. On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells. *Environ. Res. Lett.* 2014. Vol. 9, no. 12, 124023. DOI: [10.1088/1748-9326/9/12/124023](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124023).

Poklad Y.V., Ermak V.M., Ryakhovskiy I. A. Influence of local time and power of solar x-rayflashes of M and X classes on the variation of frequency of first mode of Schumann resonance. *Proc. SPIE*. Vol. 10833: 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. International Society for Optics and Photonics. 2018. P. 2091–2094. DOI: [10.1117/12.2504511](https://doi.org/10.1117/12.2504511).

Poklad Y.V., Ermak V.M., Ryakhovskiy I.A., Rybakov V. Variation of frequency of first mode of schumann resonance under solar x-ray flashes and its relation with heliogeophysical conditions. *Proc. SPIE*. Vol. 11208: 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. International Society for Optics and Photonics. 2019. P. 1910–1913. DOI: [10.1117/12.2540671](https://doi.org/10.1117/12.2540671).

Rodger C.J., Brundell J.B., Dowden R.L., Thomson N.R. Location accuracy of long distance VLF lightning location network. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 747–758. DOI: [10.5194/angeo-22-747-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-747-2004).

Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 1563–1576. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00112-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00112-7).

Salby M.L. Sampling theory for synoptic satellite observations Part I: Space-time spectra, resolution and aliasing. *J. Atmos. Sci.* 1982a. Vol. 39, iss. 11. P. 2577–2600. DOI: [10.1175/1520-0469\(1982\)039<2577:STFASO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<2577:STFASO>2.0.CO;2).

Salby M.L. Sampling theory for synoptic satellite observations. Part II: Fast Fourier synoptic mapping. *J. Atmos. Sci.* 1982b. Vol. 39, iss. 11. P. 2601–2614. DOI: [10.1175/1520-0469\(1982\)039<2601:STFASO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<2601:STFASO>2.0.CO;2).

Tinsley B.A. Influence of the solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics of the troposphere. *Space Sci. Rev.* 2000. Vol. 94. P. 231–258. DOI: [10.1023/A:1026775408875](https://doi.org/10.1023/A:1026775408875).

Williams E.R. Lightning and climate: A review. *Atmos. Res.* 2005. Vol. 76. P. 272–287. DOI: [10.1016/j.atmosres.2004.11.014](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.014). URL: <https://wwlln.net> (дата обращения 20 октября 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Денисенко В.В., Ляхов А.Н. Сравнение наземных и спутниковых данных о пространственно-временном распределении грозных разрядов при низкой солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 111–119. DOI: [10.12737/szf-74202112](https://doi.org/10.12737/szf-74202112).