

ВЛИЯНИЕ ОБЛАЧНОСТИ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ В АТМОСФЕРЕ

INFLUENCE OF CLOUDS ON SPATIAL DISTRIBUTION OF CONDUCTIVITY IN THE ATMOSPHERE

В.В. Денисенко 

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

Е.В. Розанов 

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия, Eugene.Rozanov@pmodwrc.ch
Физико-метеорологическая обсерватория Давоса
и Всемирный радиационный центр,
Давос, Швейцария

V.V. Denisenko

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

E.V. Rozanov

Saint Petersburg State University,
Saint Petersburg, Russia, Eugene.Rozanov@pmodwrc.ch
Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos
and World Radiation Center,
Davos, Switzerland

Аннотация. В данной статье мы рассматриваем атмосферную часть глобальной электрической цепи. При изучении крупномасштабных токов в атмосфере, протекающих от ионосферы к Земле, ионосферу и поверхность Земли можно с хорошей точностью рассматривать как идеальные проводники. Эти токи определяются напряжением между поверхностью Земли и ионосферой, а также пространственным распределением проводимости в атмосфере. Мы используем одномерную модель атмосферных электрических полей и токов, в которой предполагается, что токи направлены практически вертикально. Тогда пространственное распределение проводимости можно свести к распределению по долготе и широте проводимости атмосферных столбов. Интегрируя проводимость по всей поверхности Земли, мы получаем полную проводимость атмосферы. Внутри облаков проводимость воздуха снижается из-за прилипания ионов к каплям воды. Основываясь на имеющихся данных о снижении локальной проводимости в пределах отдельных облаков, мы анализируем влияние распределения плотности облаков по широте, долготе и высоте на географическое распределение проводимости и полную проводимость атмосферы. На примере 2009 г. показано, что облачность снижает полную проводимость атмосферы на 20 %. Ее вариации в течение дня и года настолько малы, что модельное электрическое поле хорошей погоды изменяется из-за облачности всего на 2 %. Судя по полученным результатам, влияние облаков на проводимость атмосферы не объясняет суточных и сезонных циклов напряженности электрического поля хорошей погоды, описываемых диаграммой Карнеги.

Ключевые слова: токи в атмосфере, электрическое поле, UT-вариация, глобальная электрическая цепь.

Abstract. In the paper, we examine the atmospheric part of the global electric circuit. When studying large-scale currents in the atmosphere flowing from the ionosphere to the ground, the ionosphere and Earth's surface can be considered as ideal conductors with high accuracy. These currents are determined by the ground-ionosphere voltage and the spatial distribution of conductivity in the atmosphere. We employ a one-dimensional model of atmospheric electric fields and currents in which currents are assumed to be nearly vertical. Then it is possible to reduce the spatial distribution of conductivity to longitude and latitude distribution of conductivity of atmospheric columns. By integrating the conductivity over the entire Earth surface, we obtain the total conductance of the atmosphere. Inside clouds, air conductivity decreases due to the ion attachment to water drops. Using available data on decrease in local conductivity within individual clouds, we analyze the effect of cloud density in latitude, longitude, and height on geographical distribution of conductivity and total conductance of the atmosphere. By the example of 2009, it is shown that cloudiness reduces the total conductance of the atmosphere by 20 %. Its variations during the day and year are so small that the model fair-weather electric field varies only by 2 % due to cloudiness. Judging by the results obtained, the influence of clouds on atmospheric conductivity does not explain the diurnal and seasonal cycles of the fair-weather electric field strength (Carnegie diagram).

Keywords: atmospheric currents, electric field, UT variation, global electric circuit.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) включает в себя электрические поля и токи, создаваемые генераторами, расположенными в магнитосфере, ионосфере и атмосфере [Мареев, 2010]. Мы рассматриваем только последнее. Обзор текущего состояния таких исследований можно найти в [Hlin et al., 2020; Rycroft et al., 2024]. Генерация в атмосфере происходит в основном за счет токов, возникающих при оседании заряженных капель или снежинок во время гроз, а также в электризованных облаках. Некоторые из этих сторонних токов замыкаются токами проводимости внутри облаков и вблизи них, но частично токи проводимости переносят заряды над облаками в ионосферу. Заряды распространяются по всей ионосфере и глобально возвращаются на землю через атмосферу. По земле, включая моря и океаны, они возвращаются в области, расположенные ниже генерирующих облаков, и, наконец, поднимаются с земли к этим облакам. Модели такого рода токов для отдельных облаков построены, например, в работах [Denisenko, 2014a; b, Denisenko, Nesterov, 2023]. При изучении атмосферных токов, текущих от ионосферы к Земле, ионосферу и земную поверхность можно с хорошей точностью рассматривать как идеальные проводники. Rycroft et al. [2024] назвали эти токи возвратными, поскольку они возвращают в землю заряды, принесенные в ионосферу из грозовых и электризованных облаков. Иногда их называют токами хорошей погоды, потому что эти токи и электрические поля, которые их создают, удобно измерять в безоблачных местах. Однако при рассмотрении облаков в настоящей статье такое название привело бы к недоразумениям. Поэтому мы будем называть их возвратными токами, а термин «токи хорошей погоды» будет использоваться для них только для действительно безоблачных районов.

Как в любой электрической цепи, напряженность электрического поля в ГЭЦ определяется как генератором, так и резистором. Суточные вариации электрического поля хорошей погоды приблизительно описываются кривой Карнеги. С самого начала это объяснялось изменениями общего количества молний на Земле. В настоящее время доступно гораздо больше данных о молниях, но результаты противоречивы. Об отсутствии корреляции между количеством молний и кривой Карнеги сообщалось в [Mezuman et al., 2014; Денисенко, Ляхов, 2021], в то время как коэффициент корреляции до 0.99 с использованием специального метода анализа был получен в [Scopra et al., 2021]. Поэтому необходимо изучить сопротивление в ГЭЦ (т. е. сопротивление атмосферы) [Zhou, Tinsley, 2010], и здесь мы разрабатываем модель полного сопротивления атмосферы, принимая во внимание пространственное распределение облачности. При рассмотрении роли облачности учитываются и другие важные параметры, такие как электропроводность безоблачной атмосферы и суммарный ток генераторов ГЭЦ.

В разделе 1 описаны используемые методы и данные. Наряду с оригинальными методами приводится

краткое описание известных методов. При рассмотрении возвратных токов одним из основных параметров является проводимость атмосферного воздуха, которая является предметом данного исследования. Наряду с новыми результатами даны краткие описания известных подходов. Так, в разделе 1.1 приведены формулы одномерной модели атмосферного проводника, которые используются для описания крупномасштабных электрических полей и токов. В разделе 1.2 модель вертикального распределения электропроводности воздуха модифицирована для учета различий между сушей и морем. В разделе 1.3 предлагается использовать вариант электропроводности воздуха, соответствующий суще над покрытыми льдом участками моря. В разделе 1.4 приведены подробности моделирования уменьшения электропроводности внутри облака. Схема расчета облачности с использованием модели земной системы SOCOLv4 [Sukhodolov et al., 2021] кратко описана в разделе 1.5. В разделе 2 рассматриваются результаты моделирования, которые в разделе 3 сравниваются с результатами других авторов. В Заключении сформулированы основные результаты работы.

1. МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Приводятся используемые методы и данные. Наряду с оригинальными методами дается краткое описание известных методов. Для построения графиков использовались различные программы. Рисунок 3 сделан с помощью PANOPLY, цветные фрагменты всех рисунков — с помощью SURFER, векторные рисунки — с помощью авторских подпрограмм FORTRAN и LATEX.

1.1. Одномерная модель атмосферного проводника

В нашей общей модели [Denisenko, Rycroft, 2024] мы рассматриваем атмосферу, ионосферу и магнитосферу как единый проводник. При описании электрических процессов в атмосфере, характерное время протекания которых превышает 15 мин, может быть использована квазистационарная модель [Molchanov, Hayakawa, 2008]. Основными уравнениями для стационарного электрического поля \mathbf{E} и плотности тока \mathbf{j} являются закон Фарадея, закон сохранения заряда и закон Ома с тензором проводимости σ . Для электрического потенциала V ($\mathbf{E} = -\nabla V$) система уравнений сводится к уравнению электропроводности

$$-\operatorname{div}(\hat{\sigma} \nabla V) = Q. \quad (1)$$

Заданная функция Q отличается от нуля, если существует сторонний электрический ток. Тогда плотность полного тока равна $\mathbf{j} + \mathbf{j}_{\text{ext}}$ и $Q = -\operatorname{div} \mathbf{j}_{\text{ext}}$, поскольку закон сохранения заряда справедлив для полного тока. Здесь мы изучаем только токи проводимости в атмосфере. Поэтому $Q=0$, а тензор проводимости σ является скаляром σ .

Мы будем использовать географические координаты ϕ , λ и высоту h , отсчитываемую от среднего уровня моря, который определен во Всемирной геодезической системе [<https://en.wikipedia.org/wiki/>

[World Geodetic System](#)] как эллипсоид вращения. Используется база данных [Hastings et al., 1999], которая определяет высоту земной поверхности над средним уровнем моря.

Ampferer et al. [2010] показали, что при горизонтальных масштабах ~ 100 км и более можно использовать одномерную модель, соответствующую вертикальности атмосферных токов. Тогда проводимость σ и потенциал V зависят только от высоты h , следовательно, краевая задача электропроводности сводится к решению одномерной задачи по h . Несложно показать, что учет сферичности Земли в этом уравнении вносит в плотность тока и сопротивление интересующего нас атмосферного столба поправку менее чем на 0.1 %. Поэтому мы пренебрегаем сферичностью и одномерная задача для уравнения (1) принимает вид

$$\frac{d}{dh} \left(\sigma(h) \frac{dV(h)}{dh} \right) = 0, \quad (2)$$

$$V|_{h=h_1} = V_0, \quad (2)$$

$$V|_{h=h_0} = 0,$$

где, строго говоря, функции $V(h)$ и $\sigma(h)$ должны иметь индексы ϕ, λ , поскольку они специфичны в каждой точке с координатами ϕ, λ , но для краткости мы опускаем эти индексы. Зависимость модельной электропроводности от всех трех координат будет подробно рассмотрена в следующем разделе. Здесь h_0 обозначает высоту $h_g(\phi, \lambda)$ земной поверхности в рассматриваемой точке; h_1 — высота, на которой начинается ионосферный проводник, который мы считаем идеальным. Подъем верхней границы h_1 атмосферного проводника выше 30 км в общепринятых эмпирических моделях электропроводности воздуха, рассмотренных в [Denisenko et al., 2019], увеличивает сопротивление атмосферного столба всего на 0.5 %. Этим можно пренебречь, поэтому мы полагаем $h_1=30$ км.

Решение (2) дает вертикальную напряженность электрического поля $E(h) = -dV(h)/dh$ и плотность тока $j = -\sigma(h)dV(h)/dh$, которая в силу (2) является вертикальной и не изменяется с высотой, а, следовательно, является функцией только ϕ и λ . Последнее обстоятельство позволяет свести решение (2) к интегрированию по высоте:

$$V_0 = -j(\phi, \lambda) \int_{h_0}^{h_1} dh / \sigma(h).$$

Интеграл от заданной функции легко вычислить, получив из этого уравнения значение $j(\phi, \lambda)$ и напряженность электрического поля, включая поле E_0 вблизи поверхности Земли. Введем аналогичное обозначение для проводимости σ_0 . Отношение

$$R(\phi, \lambda) = -V_0 / j(\phi, \lambda) = \int_{h_0}^{h_1} dh / \sigma(h) \quad (3)$$

представляет собой сопротивление атмосферного столба, имеющего поперечное сечение 1 м^2 . В нашей модели, если не учитывать облачность, оно определяется только высотой поверхности h_0 , но имеет другое, единое значение над морями. Напряженность

электрического поля вблизи поверхности Земли равна

$$E_0 = -V_0 / (R\sigma_0), \quad (4)$$

поэтому в отношении связи напряженности электрического поля и плотности тока вблизи поверхности Земли вертикальный столб воздуха эквивалентен однородному столбу с постоянной проводимостью σ_0 и толщиной

$$H = R\sigma_0. \quad (5)$$

Параметр H называется толщиной однородного атмосферного проводника над рассматриваемой точкой поверхности [Denisenko, 2024]. Он аналогичен высоте однородной атмосферы, используемой в метеорологии, но описывает проводимость, а не массу. Параметр H зависит от широты и долготы из-за зависимостей $R(\phi, \lambda)$ и $\sigma_0(\phi, \lambda)$, в то время как в нашей упрощенной модели электропроводности, представленной в следующем разделе, он имеет общее значение для морей и океанов при хороших погодных условиях. При экспоненциальном увеличении электропроводности с высотой $\sigma(h) = \sigma_0 \exp(h/a)$ получается $H=a$. В общем случае H — характеристическая шкала роста электропроводности с высотой.

Величина $\Sigma(\phi, \lambda) = 1/R(\phi, \lambda)$, обратная $R(\phi, \lambda)$, представляет собой проводимость атмосферного столба, имеющего поперечное сечение 1 м^2 . Интеграл от $\Sigma(\phi, \lambda)$ по всей поверхности Земли дает проводимость атмосферы в целом Σ_{tot} , т. е. как проводящей атмосферы, заключенной между двумя идеальными проводниками: поверхностью Земли и ионосферой. Обратная величина — это сопротивление глобального атмосферного проводника

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{\Sigma_{\text{tot}}} = 1 / \int \Sigma(\phi, \lambda) R_E^2 \cos(\lambda) d\lambda d\phi, \quad (6)$$

где R_E — радиус Земли, а интегрирование проводится по всей ее поверхности. С учетом (3), (4) полный возвратный ток ГЭЦ

$$I = V_0 / R_{\text{tot}}. \quad (7)$$

В силу (4), (5), (7)

$$E_0 = R_{\text{tot}} I / H. \quad (8)$$

В стационарном процессе это значение не только соответствует току, который разряжает конденсатор земля — ионосфера, но и равно току зарядки. Последний параметр описывает суммарный генератор ГЭЦ и поэтому является основным параметром, в то время как V_0 — это результат накопления заряда в ионосфере до значения, при котором ток разрядки равен току зарядки. Поэтому, когда мы обсуждаем ГЭЦ в целом, уместно использовать формулу (8), в которой задан именно I . Часто нас интересует напряженность электрического поля хорошей погоды в воздухе вблизи поверхности моря

$$E_0^{\text{sea}} = R_{\text{tot}} I / H^{\text{sea}}. \quad (9)$$

Значения последних двух параметров в формуле (9) не изменяются, когда мы изучаем только роль облачности, и поэтому E_0^{sea} пропорционально R_{tot} . Это

упрощает сравнение полученных значений R_{tot} с кривыми Карнеги, построенными на основе измерений E_0^{sea} .

Необходимо упомянуть о пределах применимости одномерной модели. Если облако разорвать таким образом, чтобы размер его фрагментов по горизонтали был не намного больше размера по вертикали, эффективная проводимость такой смеси фрагментов облака с чистым воздухом может значительно возрасти. Это зависит от реальной геометрии фрагментов. Мы не видим возможности принять это во внимание, поскольку нам не известны количественные модели или измерения такой мелкомасштабной структуры с глобальным описанием. Мы рассчитываем плотность облаков, используя глобальную модель общей циркуляции [Sukhodolov et al., 2021] с разрешением по горизонтали ~ 200 км. Из-за этого полученное влияние облачности может быть переоценено. Это обсуждается далее в разделе 3.

1.2. Модель проводимости воздуха

Проводимость воздуха, особенно вблизи поверхности Земли, в нормальных условиях может изменяться на порядок [Handbook of Geophysics, 1960]. При повышенном выделении радона вследствие его радиоактивности концентрация ионов в воздухе увеличивается и, следовательно, проводимость увеличивается в несколько раз [Harrison et al., 2010; Pulinets et al., 2022]. С увеличением содержания пыли в воздухе электропроводность может существенно снижаться [Harrison et al., 2010]. Makino, Ogawa [1985] построили распределение электропроводности по высоте, рассмотрев ионизацию космическими лучами и излучением радона, а также осаждение ионов на частицах облака. Мы используем такое распределение на высотах более 5 км с некоторыми изменениями, приведенными ниже, принимая во внимание новые данные о соотношении электрического поля хорошей погоды над морем и землей, как описано ниже в этом разделе.

Таким образом, существует множество эмпирических моделей высотного распределения электропроводности атмосферы. Мы основываемся на модели, предложенной в монографии [Molchanov, Hayakawa, 2008], и модифицируем ее для низких 4 км от поверхности Земли. В отсутствие облаков электропроводность рассчитывается с помощью формул, в которых она выражается в См/м, а высота — в километрах:

$$\log_{10}(\sigma(h)) = -12.7 + \frac{h}{18.4} - \begin{cases} 0.77 \left(\frac{h}{4} - 1 \right)^2 & \text{при } h < 4 \text{ над морем} \\ 1.3 \left(\frac{h - h_0}{4} - 1 \right)^2 & \text{при } h < h_0 + 4 \text{ над сушей.} \end{cases} \quad (10)$$

Напомним, что h_0 обозначает высоту $h_g(\phi, \lambda)$ земной поверхности в рассматриваемой точке. При задании в этих формулах коэффициентов использовались следующие соображения. Часть проводимости,

общей для суши и моря, в (10) обусловлена ионизацией воздуха космическими лучами [National Research Council, 1986], эту часть мы взяли из модели [Molchanov, Hayakawa, 2008].

Остальные члены описывают пограничные слои, которые возникают вблизи поверхности в основном из-за аэрозолей и радона. В [Денисенко, 2024] было проведено сравнение сезонных диаграмм напряженности электрического поля хорошей погоды, построенных для моря и суши. Первая из них была построена в [Денисенко и др., 2023] в соответствии с данными [Harrison, 2013] измерений во время VII круиза миссии Карнеги. Такая диаграмма Карнеги (рис. 1) позволяет лучше визуализировать несколько кривых Карнеги, построенных в [Harrison, 2013] для разных сезонов. Следует отметить, что эта диаграмма построена по небольшому количеству данных, особенно в летний период, как описано в [Harrison, 2013] и в оригинальной публикации данных Карнеги [Torgeson et al., 1946], поскольку хорошая погода была редко.

Для правой диаграммы (см. рис. 1) использовались полевые измерения в Томской обсерватории, расположенной на низменной равнине [Pustovalov et al., 2022]. Оказалось, что среднее поле 130 В/м и его вариации над морем вдвое меньше, чем над сушей (260 В/м). Это означает, что толщина однородного атмосферного проводника H в условиях хорошей погоды над морем в два раза больше, чем над сушей. Соответственно (10) дают 2.0 и 1.0 км. Это соответствует напряжению 260 кВ земля — ионосфера, которое находится в характерном для ГЭЦ диапазоне 240–300 кВ [Markson, 2007]. В работе [Jeni Victor et al., 2017] было показано, что для антарктической станции Восток, расположенной на высоте ~ 3.5 км над уровнем моря, $H \approx 1$ км.

Нижняя диаграмма аналогична диаграмме, полученной в обсерватории Восток в Антарктиде [Lavigne et al., 2017]. Она принципиально отличается от двух предыдущих диаграмм тем, что электрическое поле хорошей погоды смещено во времени примерно на полгода. Это противоречит общей идеи ГЭЦ: электрическое поле хорошей погоды изменяется синхронно по всему земному шару. У нас нет предложений, как объяснить это противоречие. Если это не опечатка, эти данные должны быть изучены с большим вниманием. Может быть, лето в Южном полушарии было спутано с летом в Северном полушарии в нумерации месяцев? В любом случае, мы пока не используем эту диаграмму.

Такой пограничный слой был распространен на равнинные участки суши, расположенные на других высотах. Предположив, что пограничный слой над морем имеет ту же толщину 4 км, мы получили коэффициент 0.77 в первой формуле (10) при $H=2$ км для моря. Мы предлагаем эти формулы только в качестве очень приблизительного описания реальности, и у нас нет информации для определения пространственного распределения электропроводности вблизи отдельных гор, в долинах и для других особенностей рельефа. Высотные распределения электропроводности, полученные из (10), показаны на рис. 2

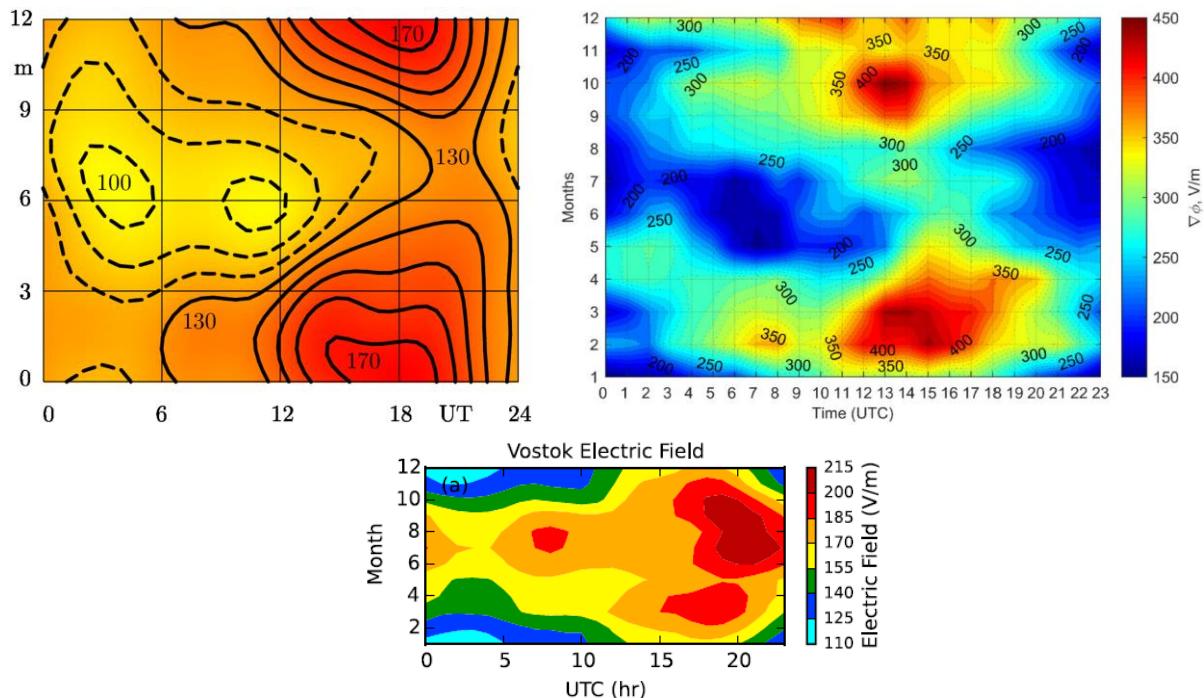


Рис. 1. Диаграмма Карнеги в координатах UT — месяц года (слева вверху). Напряженность электрического поля хорошей погоды в воздухе вблизи поверхности моря E_0^{sea} в единицах В/м с контурным интервалом 10 В/м. Сплошные линии — для $E_0^{\text{sea}} \geq 130$ В/м, штриховые — для $E_0^{\text{sea}} \leq 120$ В/м. Диаграмма построена в [Денисенко, 2024]. Справа — аналогичная диаграмма для Томской обсерватории, расположенной на низменной равнине в Сибири [Pustovalov et al., 2022]. Внизу — аналогичная диаграмма для обсерватории «Восток» (Антарктида) [Lavigne et al., 2017]

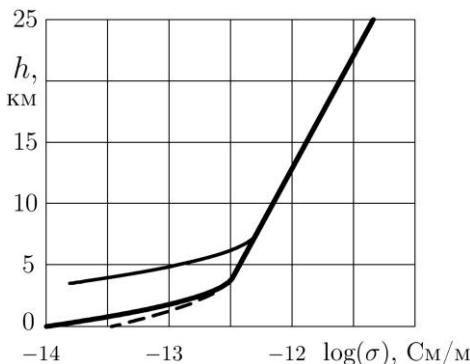


Рис. 2. Модельные высотные распределения электропроводности воздуха над морем (штриховая линия) и над сушей: низменной (жирная линия) и расположенной на высоте 3.5 км (тонкая сплошная линия)

для моря и сушки (низменной и расположенной на высоте 3.5 км). Эти распределения могут быть использованы для вычисления сопротивления атмосферного столба по формуле (3). Над низменной сушей и над морем получаются сопротивления $9.5 \cdot 10^{16}$ и $5.9 \cdot 10^{16}$ Ом·м² соответственно.

1.3. Учет морского льда

Проводимость приземного воздуха в основном зависит от наличия радона и пыли. Радон можно было бы учитывать за счет увеличения проводимости в зависимости от географических координат, как это сделано в моделях [Anisimov et al., 2020; Golubenko et al., 2020; Baumgaertner et al., 2014]. Наша упрощенная модель электропроводности воздуха (10)

не различает типы грунта (песок, лес, снег и др.). В соответствии с моделью [Molchanov, Hayakawa, 2008] она дает в три раза меньшее значение для грунта по сравнению с морем. Это означает, что в нашем подходе более важным является именно снижение электропроводности из-за пыли. Поэтому в (10) естественно моделировать лед на поверхности моря как грунта — такого же, как снег или лед на суше. В любом случае мы не изучаем влияние радона. Эффекты можно анализировать отдельно, чтобы понять их роль, в то время как они должны учитываться в общей модели с изучением их взаимовлияния.

Ежедневное глобальное распределение концентрации морского льда дано в базе данных Copernicus Marine [<https://data.marine.copernicus.eu/products>]. В качестве примера на рис. 3 показано глобальное распределение концентрации льда, взятое из [<https://data.marine.copernicus.eu/products>] на 1 октября 2009 г., когда площадь льда в Северном полушарии близка к годовому минимуму. Поскольку крупномасштабная ледовая обстановка меняется довольно медленно, мы взяли данные только за 13 дней 2009 г.: первые числа каждого месяца и 31 декабря. Пространственная сетка для этих данных также слишком подробна для наших целей: шаг по широте и долготе составляет $\approx 0.08^\circ$. Поэтому мы усредняем данные с шагом $\approx 3^\circ$ по ячейкам нашей сетки, на которой мы имеем данные об облачах. Полученные 13 массивов чисел используются для определения концентрации льда в каждый день года путем линейной интерполяции по времени в течение каждого месяца. При концентрации льда более 50 % мы рассматри-

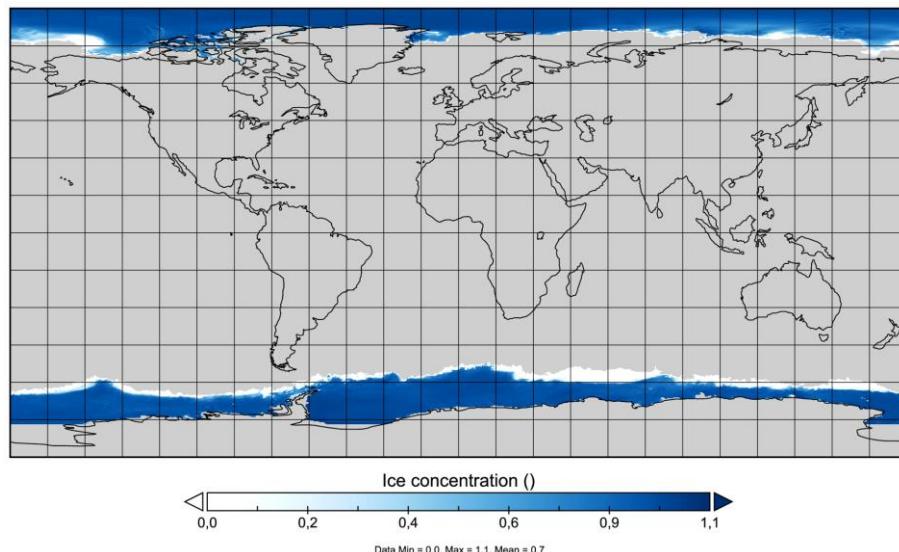


Рис. 3. Концентрация морского льда на 1 октября 2009 г. [<https://data.marine.copernicus.eu/products>]

риаем этот участок как сушу, используя формулы (10).

1.4. Влияние облаков на электропроводность воздуха

Проводимость атмосферного воздуха в основном определяется ионами, которые образуются под действием космических лучей. Равновесные концентрации ионов определяются балансом процессов ионизации и рекомбинации. При наличии капель воды, которые поглощают попадающие на них ионы, количество ионов в воздухе уменьшается. Если в основном ионы одного и того же знака прилипают к каплям, капли становятся заряженными и вносят свой вклад в ток проводимости, а также в сторонний ток, вызванный, например, оседанием капель в гравитационном поле Земли. Мы явно не рассматриваем сторонний ток, создаваемый гравитационным оседанием заряженных капель, хотя именно этот процесс в грозовых и электризованных облаках является генератором ГЭЦ, поскольку мы считаем генератор ГЭЦ заданным. Подвижность капель на много порядков меньше подвижности ионов, и поэтому их вкладом в ток проводимости можно пренебречь, а проводимость, обусловленная ионами, уменьшается пропорционально уменьшению их концентрации.

В работе [Harrison et al., 2020] было показано, что характерно пятикратное снижение проводимости воздуха внутри облака; в работе [Rycroft, Odzimek, 2010] типичным считалось 10-кратное снижение. Такое же сокращение в [Golubenko et al., 2020] рассматривается как одно из возможных. В [Karagodin et al., 2019] в качестве возможных рассматривались сокращения на один и два порядка. Мы используем предположение о пятикратном снижении электропроводности в типичном облаке как наиболее обоснованное.

Необходимо упомянуть противоположную точку зрения. Slyunyaev et al. [2014] предположили, что внутри грозовых облаков электропроводность уменьшается. Они представили варианты умножения

на число от 1 до 0 (с особым вниманием к множителю 0,1, как и в статьях, упомянутых выше). Но они также рассмотрели увеличение внутри грозовых облаков с вариантами умножения на число от 1 до 11. К сожалению, не были приведены никакие аргументы в пользу такого увеличения, а также какие-либо соображения по выбору значений этих параметров. Поэтому мы не используем этот подход.

Проводимость также снижается в присутствии аэрозолей и увеличивается из-за ионизации молекул воздуха излучением радона [Harrison et al., 2010], но в этой статье мы рассматриваем только роль облаков. Чтобы учесть различную плотность облаков $c(\varphi, \lambda, h)$, которая может варьироваться от 0 до 1 (часто выражается в %), мы используем следующую формулу для преобразования проводимости σ в $\tilde{\sigma}$:

$$\tilde{\sigma}(\varphi, \lambda, h) = \sigma(\varphi, \lambda, h) / (1 + 4c(\varphi, \lambda, h)), \quad (11)$$

т. е. в отсутствие облаков электропроводность не меняется, но при полной облачности она уменьшается в пять раз в соответствии с данными [Harrison et al., 2020]. В этой статье мы используем пространственные распределения облачности, заданные в ячейках сетки. Формула (11) с облачностью $c < 1$ получается, если часть ячейки с площадью горизонтального перечного сечения $(1-c)S$ занята воздухом, проводимость которого описывается (10), а остальная площадь cS занята облаком, проводимость которого в пять раз меньше. Здесь S — это площадь самой ячейки сетки. При вычислении интеграла (3) мы пренебрегаем горизонтальными токами. Это приблизительно верно, когда части ячеек сетки, занятые облаками, находятся одна под другой, и становится точным, если эти части одинаковы по всему вертикальному столбцу ячеек и этот столбец не зависит от соседних, т. е. изолирован от них. Несложно показать, что такой одномерный подход точен для структуры вертикальных атмосферных столбов, которые имеют плотности облаков $c(\varphi, \lambda)$, не зависящие от высоты, и общие исходные (без облаков) распределения электропроводности по высоте, что

означает $\tilde{\sigma}(\varphi, \lambda, h) = \sigma(h) / (1 + 4c(\varphi, \lambda))$. В таком случае электрическое поле является вертикальным и зависит только от высоты, плотность тока также строго вертикальна.

Если участки, занятые облаком в таком столбце, будут значительно смещены друг от друга по горизонтали, мы получим завышенную проводимость воздушного столба. Для уточнения этого подхода требуется знание распределения облачности внутри ячейки, что на самом деле требует данных на более подробной сетке. У нас их нет, и поэтому мы предполагаем плавное изменение облачности с высотой, что приводит к формуле (3). Важно также, что это предположение в сочетании с большими размерами ячеек горизонтальной сетки позволяет нам оставаться в рамках одномерной модели атмосферного проводника (2).

1.5. Облачность

Средние характеристики поля облачности за двухчасовые интервалы за весь 2009 г. были рассчитаны с использованием модели земной системы SOCOLv4 [Sukhodolov et al., 2021] в рамках проекта по сравнению химических и климатических моделей. Границные условия, необходимые для расчетов, определяющие состояние атмосферы, были заимствованы из рекомендаций для сценария D1 [URL: https://cpb-eu-w2.wpmucdn.com/blogs.reading.ac.uk/dist/7/201/files/2020/09/CCMI-2022_REF-D1_proposal_20200921.pdf], предложенных участникам проекта CCMI-2022. Вычисления для облаков выполняются в модуле физических процессов ECHAM6.3, являющимся неотъемлемой частью модели SOCOLv4, подробно представленной в [Stevens et al., 2013; Mauritsen et al., 2019]. Смоделированные свойства облачных полей находятся в удовлетворительном соответствии с наблюдениями, например [Neubauer et al., 2019].

Используя рассчитанные значения температуры, влажности и других физических параметров состояния атмосферы, модуль рассчитывает характеристики облаков различных типов, включая долю облачного слоя во всех ячейках модели. Таким образом, в данной работе используются рассчитанные трехмерные (долгота, широта, высота над уровнем моря) поля плотности облаков с шагом по времени 2 ч. Кроме того, модель предоставляет также двумерную (долгота, широта) облачность $C(\varphi, \lambda)$, которая рассчитывается с использованием вертикального профиля облаков $c(\varphi, \lambda, h)$ с учетом облачности в каждой модельной ячейке, как это видно из космоса. Для этого расчета в модели земной системы SOCOLv4 используется довольно сложное правило, но по сути оно близко к максимуму $c(\varphi, \lambda, h)$ на анализируемой вертикальной линии. Мы используем параметр $C(\varphi, \lambda)$ не в моделировании, а только для визуализации облачности в разделе 3.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате расчетов по формулам (3), (6), (10), (11) получены значения полного сопротивления атмосферы R_{tot} за 365 дней 2009 г. с двухчасовым ин-

тервалом. Для каждого момента UT выполнялось усреднение с интервалом ± 0.5 от каждого целого значения m , где m — время, прошедшее с начала года в месяцах. Если грозовые генераторы подводят постоянный ток I в ионосферу в течение года, то полный (суммарный по всей Земле) возвратный ток будет равен такой же постоянной величине из-за стационарности процесса. Следовательно, разность потенциалов земля—ионосфера $V_0 = R_{\text{tot}} I$ (5) будет изменяться пропорционально R_{tot} . В соответствии с определением толщины однородного атмосферного проводника H напряженность электрического поля на поверхности Земли равна $E_0 = -V_0/H$. Для поля хорошей погоды над морем в соответствии с (9) значение E_0^{sea} пропорционально R_{tot} . Для проводимости (10) получено значение $H^{\text{sea}} = 2$ км.

Рассчитанное среднее значение за 2009 год составляет $\langle R_{\text{tot}} \rangle = 136.2$ Ом. Если предположить, что средняя напряженность поля хорошей погоды над морем $\langle E_0^{\text{sea}} \rangle = 130$ В/м и использовать (4), (5), то получим среднее значение $\langle V_0 \rangle = \langle E_0^{\text{sea}} \rangle H^{\text{sea}} = 260$ кВ, и в силу (7) получаем постоянный ток ГЭЦ $I = \langle V_0 \rangle / R_{\text{tot}} = 1.9$ кА. Эти значения типичны для ГЭЦ [Мареев, 2010]. Используя соотношение $E_0 = -R_{\text{tot}} (I/H)$ (8) и постоянство дроби в круглых скобках, исходя из полученных изменений R_{tot} в течение года, мы переходим к пропорциональному изменению поля хорошей погоды над морем:

$$\delta E_0 = E_0 - \langle E_0 \rangle = -(R_{\text{tot}} - \langle R_{\text{tot}} \rangle)(I/H).$$

Они показаны на левой панели рис. 4. С учетом последней формулы и значения $I/H \approx 1$ А/м рис. 4 также приблизительно демонстрирует изменение R_{tot} в Омах. Можно отметить, что без усреднения в течение каждого месяца значения, полученные для одного и того же момента времени UT, показывают отклонения примерно в два раза большие. Мы не строим такой график, поскольку столь подробные данные о E_0 недоступны. Более того, диаграмма Карнеги на рис. 1 представляет E_0 с усреднением за три месяца.

Временные точки 00 UT и 24 UT различаются для каждого отдельного дня, но после усреднения ежедневного хода в течение месяца мы получаем почти одинаковые значения в 00 UT и 24 UT, поскольку конец каждого дня, за исключением последнего, является началом следующего. Таким образом, усредненная функция, показанная на рис. 4, почти точно является периодической по UT.

Поле в конце декабря отличается от поля в начале января примерно на 0.5 В/м (см. рис. 4). Функция δE_0 (UT, m) станет приблизительно периодической по m с периодом 1 год, если, например, из нее вычесть линейную функцию $(m/6 - 1) 0.15$ В/м. Она имеет нулевое среднее значение и может считаться тенденцией на протяжении нескольких лет. Такая преобразованная функция показана справа на рис. 4.

Основным видимым свойством переменной части полученного возмущения поля хорошей погоды

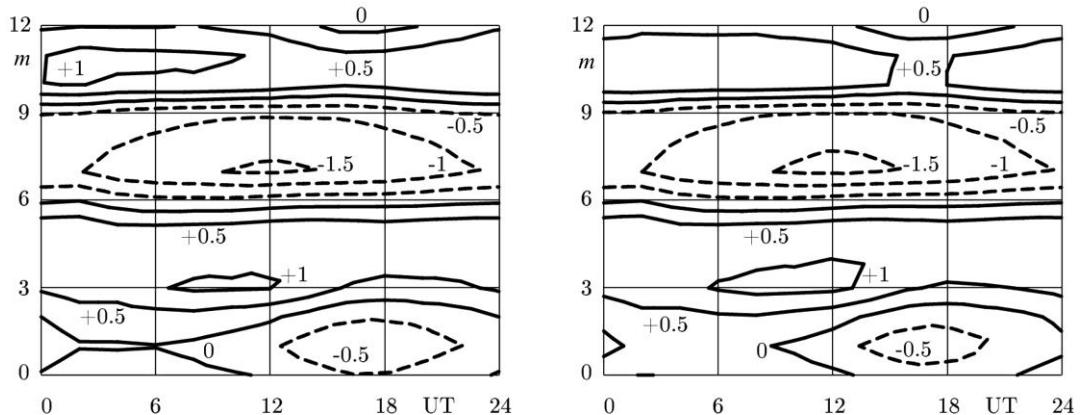


Рис. 4. Возмущение электрического поля хорошей погоды над морем δE_0 (В/м); m — время с начала года (мес). Правый фрагмент получен из левого путем исключения тренда за несколько лет. Графики приблизительно отражают также изменения R_{tot} [Ом]

из-за облачности является ее уменьшение примерно на 1 В/м с июня по октябрь. При сравнении с вариациями, описанными диаграммой Карнеги, мы видим, во-первых, на порядок меньшие вариации, во-вторых, отсутствие существенного увеличения во второй половине дня (в UT), в-третьих, основную сезонную гармонику, которая является не годовой, а полугодовой. Можно сказать, что, судя по полученным результатам, облачность не позволяет нам объяснить диаграмму Карнеги.

Однако средняя облачность значительно увеличивает среднее поле хорошей погоды. Как уже отмечалось, среднее значение полного сопротивления атмосферы за 2009 г. составляет $\langle R_{\text{tot}} \rangle = 136$ Ом. Если бы на всей Земле было безоблачное небо, то оно составило бы $\langle R_{\text{tot}} \rangle = 114$ Ом. Соответственно

$E_0 = -R_{\text{tot}} (I / H)$ (8) будет составлять 109 вместо 130 В/м, т. е. облачный покров увеличивает среднее поле хорошей погоды примерно на 20 %. Это значительное увеличение средней напряженности поля с небольшими колебаниями обусловлено небольшими сезонными колебаниями средней облачности на Земле.

Отметим, что если бы мы не переклассифицировали морскую поверхность, занятую льдом, в сушу (в смысле применения (10) для определения проводимости воздуха), то при полном отсутствии облаков вместо $\langle R_{\text{tot}} \rangle = 114$ Ом было бы $\langle R_{\text{tot}} \rangle = 112$ Ом. Следовательно, лед увеличивает среднюю напряженность поля хорошей погоды примерно на 2 %. Эта добавка мало изменяется в течение года, поскольку увеличение и уменьшение площади льда в обоих полушариях происходит в противоположных фазах.

Облачность вызывает также широтное перераспределение атмосферной проводимости. В основном это происходит в низких широтах, как показано на рис. 5 на примере двух наиболее отличающихся в этом отношении месяцев — февраля и августа. Вычисляется проводимость атмосферного столба $d\Sigma_{\text{tot}}$ над каждой полосой между двумя параллелями от λ до $\lambda + d\lambda$ и строится функция, равная отношению $d\Sigma_{\text{tot}} / d\lambda$. Если бы поверхность Земли была однородной, эта функция была бы пропорциональна $\cos\lambda$

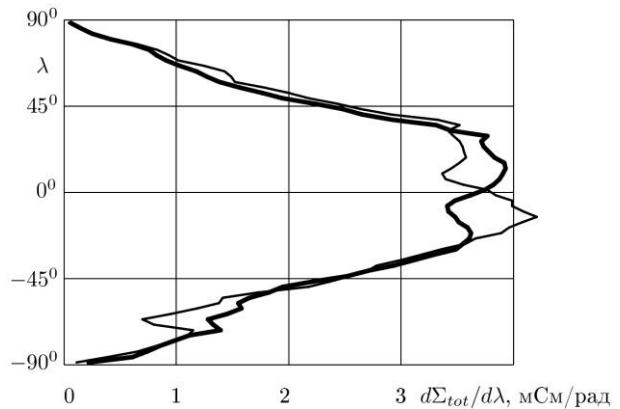


Рис. 5. Широтное распределение проводимости $d\Sigma_{\text{tot}} / d\lambda$ в 02 UT 1 февраля (жирная кривая) и 1 августа (тонкая кривая) 2009 г.

соответственно длине параллели. В высоких широтах изменения происходят в основном из-за смещения границ плавучего льда, поскольку, в силу (10), проводимость атмосферного столба над открытой водой в 1.6 раза больше, чем над льдом. В Северном полушарии этот эффект слабее, поскольку там зона таяния морского льда имеет меньшую площадь из-за большей площади суши.

Следует отметить, что сезонное перемещение грозовых зон по широте значительно больше. Как показано в [Денисенко, Ляхов, 2021] на основе данных Всемирной сети определения местоположения молний (World Wide Lightning Location Network, WWLLN), основные характеристики которых описаны в [Rodger et al., 2004], при среднегодовой широте регистрации молний $\sim 5^\circ$ происходит смещение на 10° к северу в июле и на 10° к югу в январе.

В качестве примера на рис. 6 показано глобальное распределение атмосферной проводимости $\Sigma(\phi, \lambda)$ в 18 UT 1 февраля 2009 г., полученное на основе (3), (10), (11) с учетом рельефа, облаков и плавучего льда. Эта проводимость атмосферного столба максимальна над высокогорьем (до $4.6 \cdot 10^{-17}$ См/м²) и минимальна при высокой облачности (до $0.2 \cdot 10^{-17}$ См/м²). Ее интеграл по долготе с весом $\cos\lambda$ для другого момента времени показан на рис. 5. Интеграл по всей

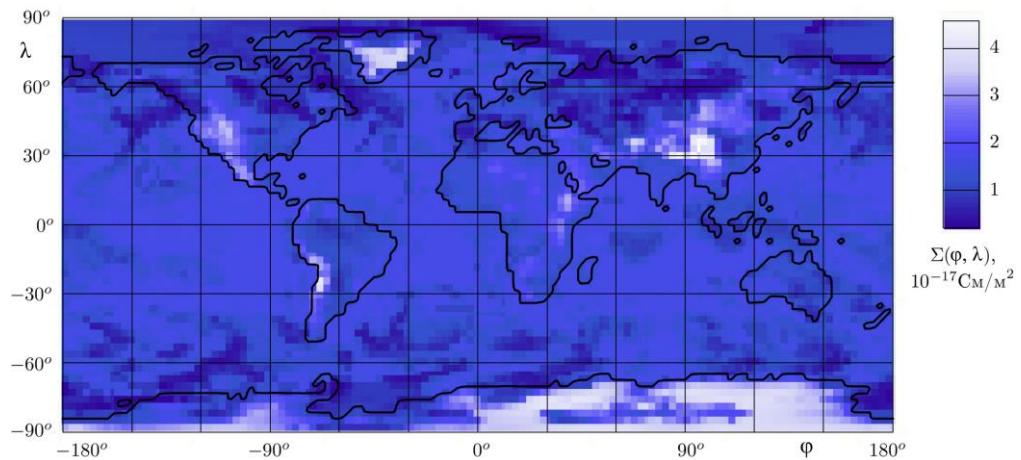


Рис. 6. Глобальное распределение атмосферной проводимости $\Sigma(\varphi, \lambda)$ в 18 UT 1 февраля 2009 г.

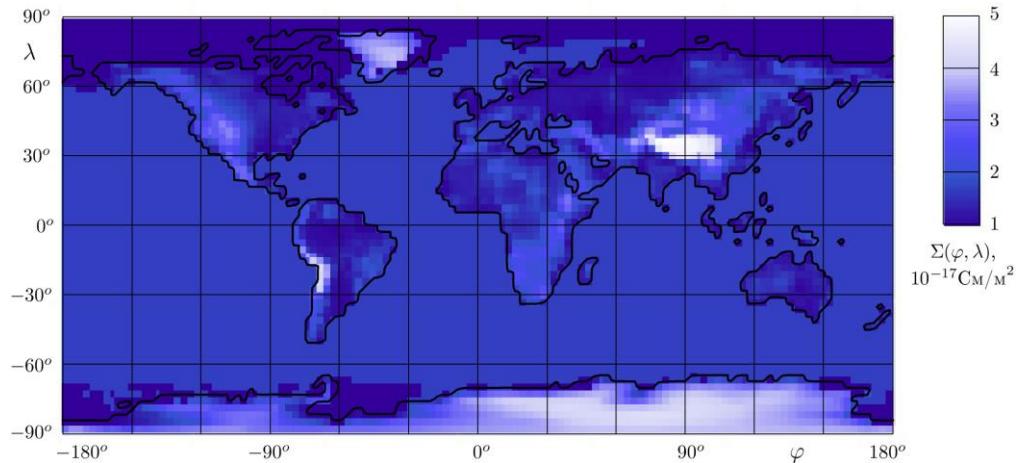


Рис. 7. Глобальное распределение атмосферной проводимости $\Sigma(\varphi, \lambda)$ в 18 UT 1 февраля 2009 г., полученное в отсутствие облачности

площади Земли равен $\Sigma_{\text{tot}} = 7.4$ мСм, это означает, что $R_{\text{tot}} = 135$ Ом.

На рис. 7 показано глобальное распределение атмосферной проводимости $\Sigma(\varphi, \lambda)$ в то же время, что и на рис. 6, но построенное без учета облаков. Наиболее очевидные различия наблюдаются над морем: однородный цвет, потому что без облаков $\Sigma(\varphi, \lambda) \equiv 1.71 \cdot 10^{-17}$ См/м²; другой однородный цвет над низменной сушей, включая лед, соответствующий $\Sigma(\varphi, \lambda) \equiv 1.05 \cdot 10^{-17}$ См/м². В отсутствие облаков граница между плавучим льдом и открытой водой видна отчетливо. Интеграл $\Sigma(\varphi, \lambda)$ по всей площади Земли равен $\Sigma_{\text{tot}} = 8.8$ мСм, это означает, что $R_{\text{tot}} = 114$ Ом. Таким образом, в данный момент времени облачность увеличила общее сопротивление атмосферы на 18 %.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [Rycroft et al., 2024] был проведен анализ различных моделей проводимости воздуха с учетом облаков, занимающих определенный высотный слой. Облачность была представлена в виде однородного слоя над определенной частью земной поверхности без ее детального пространственного

распределения. В то же время постоянное значение $R_{\text{tot}} = 250$ использовалось для нормализации соотношения между проводимостями в атмосфере с облачностью и без нее. Это сделано с целью сохранения характерных параметров ГЭЦ: суммарного тока 1 кА и напряжения земля—ионосфера 250 кВ. Мы основываемся на том факте, что внутри облака, характеризующегося 100-процентной облачностью, электропроводность уменьшается в пять раз, что следует из данных [Harrison et al., 2020]. Зафиксирован суммарный ток ГЭЦ 1.9 кА, что обеспечивает среднюю напряженность электрического поля хорошей погоды 130 В/м над морем. Разница в результатах лежит в пределах неопределенности данных о проводимости атмосферы.

В начале настоящего исследования мы ожидали, что облачность окажет гораздо более значительное влияние на ГЭЦ. Было получено, что она увеличивает общее сопротивление атмосферы на 20 %, что было ожидаемо. Неожиданностью является то, что это увеличение имеет такие небольшие колебания в течение года, всего ± 2.5 %, если сравнивать каждые два часа в течение года, или даже всего ± 1 % после ежемесячного усреднения этих значений, полученных для одного и того же UT. С учетом (9) напряженность электрического поля хорошей погоды над морем

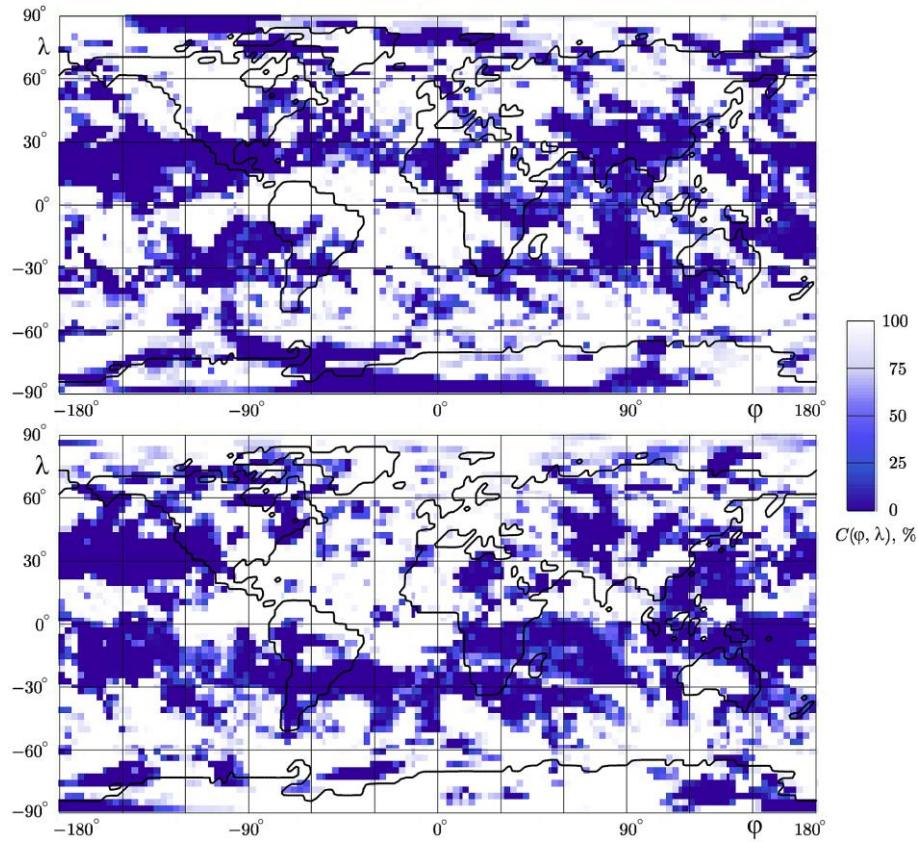


Рис. 8. Глобальное распределение общего количества облаков $C(\phi, \lambda)$ [%]. Верхняя и нижняя панели соответствуют 18 UT 1 февраля и 1 августа 2009 г. соответственно

E_0^{sea} пропорциональна R_{tot} , когда генераторы ГЭЦ не изменяются. Полученные 2 % незначительны по сравнению с вариациями $\pm 25\%$ E_0^{sea} , показанными диаграммой Карнеги на рис. 1.

Чтобы продемонстрировать неожиданность малости колебания R_{tot} из-за облачности, на рис. 8 показано глобальное распределение полной облачности $C(\phi, \lambda)$. Верхняя панель соответствует той же дате и UT, что и на рис. 6 (1 февраля 2009 г., 18 UT), нижняя соответствует 18 UT 1 августа 2009 г. Мы видим большую разницу между этими распределениями и, следовательно, можем ожидать существенные различия между соответствующими R_{tot} . Тем не менее, усредненные по земному шару значения $\langle C(\phi, \lambda) \rangle$ практически равны — 57.9 % и 57.5 % при относительной разнице в -0.7% . Соответствующие значения R_{tot} также отличаются только на $\sim +1\%$ (134.7 и 136.1 Ом). В противоположности знаков нет противоречия, хотя это было бы невозможно, если бы локальная облачность уменьшалась в каждой точке трехмерного пространства.

Odzimek et al. [2010] изучали облачность, используя общую модель ГЭЦ. Они получили примерно в два раза большие значения R_{tot} , чем наши, которые ближе к результатам 160–180 Ом в [Tinsley, Zhou, 2006]. Полученные в [Odzimek et al., 2010] UT вариации были близки к нашему 1 %. Эта модель показала значительное снижение R_{tot} в июле по сравнению с декабрем на 6 %, в отличие от нашего -1% .

Прежде всего, в работе [Odzimek et al., 2010] были использованы наблюдаемые глобальные распределения облачности, в то время как для нашего моделирования мы используем модель земной системы SOCOLv4 [Sukhodolov et al., 2021]. Другими словами, были рассмотрены области, покрытые облаками, в отличие от нашего трехмерного распределения облачности. Во-вторых, для расчета уменьшения электропроводности внутри облаков использовалась сложная модель и ее результаты не описаны отдельно от результатов общей модели. Поэтому мы не можем сравнить их с нашим простым уменьшением проводимости, зависящим от локальной плотности облаков (11). Наша диаграмма на рис. 4 показывает R_{tot} за весь год, в то время как в [Odzimek et al., 2010] были изучены только несколько дней, что может также частично объяснить различия.

Baumgaertner et al. [2014] изучили влияние размера и формы небольших облаков в качестве поправки к одномерной модели (2). Были получены данные об эффективном сопротивлении столбов для различных форм и положений небольших облаков, а также трехмерные распределения плотности электрического тока и электрического потенциала вблизи облаков. Предположив десятикратное уменьшение электропроводности внутри облаков, они получили увеличение полного сопротивления атмосферы R_{tot} из-за облачности на 48 % в одномерном приближении и на 41 % в их полной трехмерной модели, в которой решается уравнение (1) без упрощения (2). Значение R_{tot} увеличилось на 84 и 70% в этих подхо-

дах, если проводимость внутри облаков была уменьшена в 25 раз.

Существенные различия были получены также при использовании различных метеорологических моделей. Эта неопределенность в одной из лучших моделей показывает трудности моделирования влияния облачности, что в основном связано с отсутствием необходимых данных. Поскольку мы предполагаем только пятикратное уменьшение электропроводности внутри облаков, наши результаты (около 20 %) не противоречат выводам Baumgaertner et al. [2014]. Наш новый результат показывает низкий уровень суточных и сезонных вариаций полного сопротивления глобального атмосферного проводника из-за облачности (около $\pm 1\%$).

В модели [Zhou, Tinsley, 2010] было получено гораздо меньшее влияние облачности на R_{tot} (~10 %), несмотря на то, что они уменьшили проводимость внутри облаков в 20 или 50 раз, что гораздо больше нашего пятикратного снижения. Была показана примерно такая же небольшая разница между декабрем и июлем, как и в нашей модели. Аналогично [Odzimek et al., 2010] для моделирования использовались наблюдаемые глобальные распределения облаков. Таким образом, были использованы области, покрытые облаками, в отличие от нашего трехмерного распределения облачности. Еще одним важным результатом этой работы и [Tinsley, Zhou, 2006] стала демонстрация важной роли аэрозолей, которые увеличивают R_{tot} примерно на 50 %.

Таким образом, наши результаты находятся в диапазоне результатов известных моделей, который довольно широк из-за сложности задачи и недостаточного объема данных.

Кроме того, мы должны сказать о масштабах влияния других параметров на проводимость атмосферы. В соответствии со старыми измерениями электропроводности атмосферы [Handbook of Geophysics, 1960] несложно оценить диапазон значений сопротивления атмосферного столба как $(6\div40)\cdot10^{16}$ Ом·м². Наша модель электропроводности (3) дает для низменной суши и моря значения $9.5\cdot10^{16}$ и $5.9\cdot10^{16}$ Ом·м² соответственно.

Полученные пространственные распределения атмосферной проводимости позволяют нам найти глобальные распределения возвратных токов, которые возвращают заряд из ионосферы на землю. Целесообразно использовать представленную нами модель в более общих моделях ГЭЦ, чтобы дополнить модели генерации ГЭЦ за счет сторонних токов в грозовых и электризованных облаках. Пара этих моделей позволит найти ионосферное электрическое поле, которое замыкает токи, приносящие заряды из атмосферы, и возвращающие их обратно.

ВЫВОДЫ

Мы модифицировали и использовали крупномасштабную модель атмосферной проводимости для расчета глобальных распределений проводимости атмосферного столба между землей и ионосферой и полного сопротивления атмосферы в 2009 г. с двухчасовым интервалом. Учтено снижение ло-

кальной электропроводности внутри облаков и разница в свойствах атмосферы над морем и сушей, к которой также отнесены участки моря, покрытые льдом.

Показано, что средняя облачность в 2009 г. увеличила общее сопротивление атмосферы на 20 %, а наличие плавучего льда — на 2 %. По сравнению с вариациями электрического поля хорошей погоды, описываемыми диаграммой Карнеги, полученные сезонные и суточные вариации за счет облачности на порядок меньше. Кроме того, во второй половине дня не наблюдается существенного увеличения UT-вариаций, а основная сезонная гармоника является не годовой, а полугодовой. Судя по полученным результатам, облачность даже частично не объясняет диаграмму Карнеги.

Основным результатом этого исследования является то, что полученные суточная и годовая изменчивость общего сопротивления глобального атмосферного проводника из-за облачности не превышают 2 %. Без проделанных здесь подробных расчетов было трудно предвидеть столь малую изменчивость по сравнению со средним вкладом 20 %.

Следует отметить, что другие атмосферные модели могут давать другое пространственное распределение облаков. Это изменило бы наши результаты, полученные с использованием модели земной системы SOCOLv4. Это особенно актуально для возможности детального моделирования капель в облаках и их способности ограничения подвижности ионов. Использование усовершенствованных моделей атмосферной проводимости при хорошей погоде может также повлиять на оценку роли облаков. Построенная модель атмосферной проводимости позволяет найти глобальные распределения возвратных токов, которые переносят заряд из ионосферы на землю.

Математическая часть работы поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2025-1606). Евгений Розанов благодарен Санкт-Петербургскому государственному университету за поддержку геофизической части работы (грант 124032000025-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Денисенко В.В. Влияние рельефа на атмосферное электрическое поле. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 1, с. 53–58. DOI: [10.12737/szf-101202407](https://doi.org/10.12737/szf-101202407) / Denisenko V.V. Influence of relief on the atmospheric electric field. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 1, pp. 49–53. DOI: [10.12737/stp-101202407](https://doi.org/10.12737/stp-101202407).
- Денисенко В.В., Ляхов А.Н. Сравнение наземных и спутниковых данных о пространственно-временном распределении грозовых 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) / Denisenko V.V., Lyakhov A.N. Comparison of ground-based and satellite data on spatiotemporal distribution of lightning discharges under solar minimum. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, iss. 4, pp. 104–112. DOI: [10.12737/stp-74202112](https://doi.org/10.12737/stp-74202112).
- Денисенко В.В., Райкрофт М.Дж., Харрисон Р.Дж. Математическая модель глобального ионосферного элек-

- трического поля, создаваемого грозами. *Известия РАН. Серия физическая*. 2023, т. 87, № 1, с. 141–147. DOI: [10.31857/S0367676522700260](https://doi.org/10.31857/S0367676522700260).
- Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи. *Успехи физических наук*. 2010, т. 180, с. 527–534. DOI: [10.3367/UFNr.0180.201005h.0527](https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201005h.0527).
- Ampferer M., Denisenko V.V., Hausleitner W., et al. Decrease of the electric field penetration into the ionosphere due to low conductivity at the near ground atmospheric layer. *Ann. Geophys.* 2010, vol. 28, iss. 3, pp. 779–787. DOI: [10.5194/angeo-28-779-2010](https://doi.org/10.5194/angeo-28-779-2010).
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A., Aphino- genov K.V. Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation. *Atmos. Res.* 2020, vol. 244, 105035. DOI: [10.1016/j.atmosres.2020.105035](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105035).
- Baumgaertner A.J.G., Lucas G.M., Thayer J.P., Mallios S.A. On the role of clouds in the fair weather part of the global electric circuit. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014, vol. 14, iss. 16, pp. 8599–8610. DOI: [10.5194/acp-14-8599-2014](https://doi.org/10.5194/acp-14-8599-2014).
- Scopa 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. Electric current penetration from a thunder- storm cloud into the middle-latitude ionosphere. *Proc. 10th Int. Conf. “Problems of Geocosmos”*. Saint Petersburg, 2014a, pp. 76–81. URL: http://geo.phys.spbu.ru/materials_of_a_conference_2014/Geocosmos2014proceedings.pdf (дата обращения 30 сентября 2024 г.).
- Denisenko V.V. Electric current penetration from a thunder- storm cloud into the ionosphere at the geomagnetic equator. 2014b, pp. 82–87. URL: http://geo.phys.spbu.ru/materials_of_a_conference_2014/Geocosmos2014proceedings.pdf (дата обращения 30 сентября 2024 г.).
- Denisenko V.V., Nesterov S.A. The ionospheric electric field above an electrified cloud. *Proc. VIII International Conference “Atmosphere, ionosphere, safety”*. Kaliningrad, 2023, pp. 147–150.
- Denisenko V.V., Rycroft M.J. Seasonal Dependence of the Equatorial Electrojets Generated by Thunderstorms. *Advanc. Space Res.* 2024, vol. 73, iss. 7, pp. 3464–3471. DOI: [10.1016/j.asr.2023.08.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.08.017).
- 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 Geophys.* 2019, vol. 40, iss. 1, pp. 1–35. DOI: [10.1007/s10712-018-9499-6](https://doi.org/10.1007/s10712-018-9499-6).
- Golubenko K., Rozanov E., Mironova I., et al. Natural sources of ionization and their impact on atmospheric electricity. *Geophys. Res. Lett.* 2020, vol. 47, e2020GL088619. DOI: [10.1029/2020GL088619](https://doi.org/10.1029/2020GL088619).
- Handbook of Geophysics*, United States Air Force. NY, The Macmillan Company. 1960. 571 p.
- Harrison R.G. The Carnegie Curve. *Surveys Geophys.* 2013, vol. 34, pp. 209–232. DOI: [10.1007/s10712-012-9210-2](https://doi.org/10.1007/s10712-012-9210-2).
- Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010, vol. 72, pp. 376–381. DOI: [10.1016/j.jastp.2009.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.12.004).
- Harrison R.G., Nicoll K.A., Mareev E., et al. Extensive layer clouds in the global electric circuit: their effects on vertical charge distribution and storage. *Proc. of the Royal Society A*. 2020, vol. 476, 20190758. DOI: [10.1098/rspa.2019.0758](https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0758).
- Hastings D.A., Dunbar P.K., Elphingstone G.M., et al. *The Global Land One-Kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0*. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305-3328, U.S.A. 1999. Digital data base on the World Wide Web. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html> (дата обращения 1 июля 2024 г.).
- Ilin N.V., Slyunyaev N.N., Mareev E.A. Toward a realistic representation of global electric circuit generators in models of atmospheric dynamics. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2020, vol. 125, e2019JD032130. DOI: [10.1029/2019JD032130](https://doi.org/10.1029/2019JD032130).
- Jeni Victor N., Frank-Kamenetsky A.V., Manu S., Panneerselvam C. Variation of atmospheric electric field measured at Vostok, Antarctica, during St. Patrick’s Day storms on 24th solar cycle. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 6332–6348. DOI: [10.1002/2017JA024022](https://doi.org/10.1002/2017JA024022).
- Karagodin A., Rozanov E., Mareev E., et al. The representation of ionospheric potential in the global chemistry-climate model SOCOL. *Sci. Total Environ.* 2019, vol. 697, 134172. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.134172](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134172).
- Lavigne T., Liu C., Deierling W., Mach D. Relationship between the global electric circuit and electrified cloud parameters at diurnal, seasonal, and interannual timescales. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017, vol. 122, pp. 8525–8542. DOI: [10.1002/2016JD026442](https://doi.org/10.1002/2016JD026442).
- Makino M., Ogawa T. Quantitative estimation of global circuit. *J. Geophys. Res.* 1985, vol. 90, pp. 5961–5966. DOI: [10.1029/JD090iD04p05961](https://doi.org/10.1029/JD090iD04p05961).
- Markson R. The global circuit intensity: its measurement and variation over the last 50 years. *Bull. American Meteorol. Soc.* 2007, vol. 88, pp. 223–242. DOI: [10.1175/BAMS-88-2-223](https://doi.org/10.1175/BAMS-88-2-223).
- Mauritsen T., Bader J., Becker T., Behrens J. Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM 1.2) and its response to increasing CO₂. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2019, vol. 11, iss. 4, pp. 998–1038. DOI: [10.1029/2018MS001400](https://doi.org/10.1029/2018MS001400).
- Mezuman K., Price C., Galanti E. On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells. *Environ. Res. Lett.* 2014, vol. 9, iss. 12, 124023. DOI: [10.1088/1748-9326/9/12/124023](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124023).
- Molchanov O., Hayakawa M. *Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results*. Tokyo, Terrapub, 2008. 189 p.
- National Research Council. The Earth’s Electrical Environment*. Washington, DC, National Academies Press, 1986. DOI: [10.17226/898](https://doi.org/10.17226/898).
- Neubauer D., Ferrachat S., Siegenthaler-Le Drian, et al. The global aerosol-climate model ECHAM6.3–HAM2.3 – Part 2: Cloud evaluation, aerosol radiative forcing, and climate sensitivity. *Geoscientific Model Development*. 2019, vol. 12, iss. 8, pp. 3609–3639. DOI: [10.5194/gmd-12-3609-2019](https://doi.org/10.5194/gmd-12-3609-2019).
- Odzimek A., Lester M., Kubicki M. EGATEC: A new high- resolution engineering model of the global atmospheric electric circuit — Currents in the lower atmosphere. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, D18207, DOI: [10.1029/2009JD013341](https://doi.org/10.1029/2009JD013341).
- Pulinets S., Ouzounov D., Karelina A., Boyarchuk K. Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere. *New Concepts. Dordrecht. Springer Nature*. 2022, 294 p. DOI: [10.1007/978-94-024-2172-9](https://doi.org/10.1007/978-94-024-2172-9).
- 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. *Atmosh.* 2022, vol. 13, pp. 614–633. DOI: [10.3390/atmos13040614](https://doi.org/10.3390/atmos13040614).
- 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, pp. 747–758. DOI: [10.5194/angeo-22-747-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-747-2004).
- Rycroft M.J., Odzimek A. Effects of lightning and sprites on the ionospheric potential, and threshold effects on sprite initiation, obtained using an analog model of the global atmospheric electric circuit. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00E37. DOI: [10.1029/2009JA014758](https://doi.org/10.1029/2009JA014758).

- Rycroft M.J., Odzimek A., Harrison R.G. Determining the time constant of the global atmospheric electric circuit through modelling and observations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2024, vol. 260, 106267. DOI: [10.1016/j.jastp.2024.106267](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106267).
- Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Kalinin A.V., Zhidkov A.A. Influence of large-scale conductivity inhomogeneities in the atmosphere on the global electric circuit. *J. Atmos. Sci.* 2014, vol. 71, pp. 4382–4396. DOI: [10.1175/JAS-D-14-0001.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0001.1).
- Stevens B., Giorgetta M.A., Esch M., et al. The atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *J. Adv. Modeling Earth Syst.* 2013, vol. 5, pp. 146–172. DOI: [10.1002/jame.20015](https://doi.org/10.1002/jame.20015).
- Sukhodolov T., Egorova T., Stenke A., et al. Atmosphere—ocean—aerosol—chemistry—climate model SOCOLv4.0: description and valuation. *Geoscientific Model Develop.* 2021, vol. 14, pp. 5525–5560. DOI: [10.5194/gmd-14-5525-2021](https://doi.org/10.5194/gmd-14-5525-2021).
- Tinsley B.A., Zhou L. Initial results of a global circuit model with variable stratospheric and tropospheric aerosols. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, D16205. DOI: [10.1029/2005JD006988](https://doi.org/10.1029/2005JD006988).
- Torreson O.W., Parkinson W.C., Gish O.H., Wait G.R. *Ocean Atmospheric-Electric Results*. Washington, D.C., Carnegie Institution of Washington Publ., 1946, 202 p. URL: <https://archive.org/details/oceanatmospheric00carn> (дата обращения 15 мая 2025 г.).
- Zhou L., Tinsley B.A. Global circuit model with clouds. *J. Atmos. Sci.* 2010, vol. 67, iss. 4, pp. 1143–1156. DOI: [10.1175/2009JAS3208.1](https://doi.org/10.1175/2009JAS3208.1).
- URL: https://en.wikipedia.org/wiki/World_Geodetic_System (дата обращения 31 октября 2025 г.).
- URL: <https://data.marine.copernicus.eu/products> (дата обращения 27 мая 2024 г.).
- URL: https://cpb-eu-w2.wpmucdn.com/blogs.reading.ac.uk/dist/7/201/files/2020/09/CCMI-2022_REF-D1_proposal_20200921.pdf (дата обращения 27 мая 2024 г.).
- Как цитировать эту статью:*
Денисенко В.В., Розанов Е.В. Влияние облачности на пространственное распределение проводимости в атмосфере. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 4, с. 79–91. DOI: [10.12737/szf-114202508](https://doi.org/10.12737/szf-114202508).