

УДК 550.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ СУТОЧНОЙ ВАРИАЦИИ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

© 2019 г. Н.В. Ильин, М.В. Шаталина, Н.Н. Слюняев

*Институт прикладной физики РАН
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: ilyin@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 03.04.2019 г.
Принята к печати 29.05.2019 г.

На основе параметризации ионосферного потенциала (ИП) впервые промоделирована сезонная динамика суточной вариации ИП за 2016–2017 гг. с помощью численной модели прогноза погоды WRF-ARW. Суточная вариация ИП, усредненная за годовые периоды моделирования, показывает хорошее согласие с классической кривой Карнеги, позволяя утверждать, что предложенная параметризация правильно воспроизводит базовые характеристики генераторов стационарной глобальной электрической цепи. Годовая вариация не имеет строгой повторяемости от года к году, но в зимний сезон Северного полушария отмечается пониженное значение ИП, а в летний — повышенное. Модельная суточная вариация демонстрирует устойчивые сезонные тренды, причем в зимний период Северного полушария вариация характеризуется только одним сильно выделенным максимумом ИП в районе 16–18 UTC величиной в 120% от среднего значения, в то время как в летний сезон кривая суточной вариации имеет два максимума заметно меньшей величины (~107% от среднего): утренний в 8–9 UTC и вечерний в 18–20 UTC. Модельный годовой ход суточной вариации согласуется с данными экспериментов по измерению приземного поля в Антарктиде в период 2006–2011 гг. Предложенная параметризация и техника моделирования позволили достаточно точно воспроизвести время достижения максимумов вариации ИП, их сезонную изменчивость, а также уменьшение амплитуды вариации в летний период Северного полушария.

Ключевые слова: глобальная электрическая цепь, ионосферный потенциал, моделирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555576-84>

ВВЕДЕНИЕ

В рамках концепции глобальной электрической цепи (ГЭЦ) вся атмосфера рассматривается как распределенный электрический контур, ток в котором поддерживается процессами разделения зарядов в облаках с развитой электрической структурой [1–5]. При этом в областях, занятых подобными облаками, ток течет вверх, в областях хорошей погоды ток течет вниз, а поверхность Земли и нижняя ионосфера замыкают электрическую цепь. В исследованиях атмосферного электричества последнего времени при анализе глобальных задач подход, ориентированный на ГЭЦ, является общепринятым [6].

Характеристики ГЭЦ, которые могут быть измерены и измеряются экспериментально, включают, например, приземное поле и плотность тока в области хорошей погоды. Особенно важной характеристикой является ионосферный потенциал (ИП) — разность потенциа-

лов между поверхностью Земли и ионосферой, практически постоянная в каждый момент времени для различных точек земной поверхности [7]; ИП может быть измерен экспериментально с помощью зондов или самолетов [8]. Измерения параметров ГЭЦ (в частности, поля хорошей погоды и ИП) мотивированы не только фундаментальным научным интересом к атмосферному электричеству, но и тем, что их динамика на различных временных масштабах отражает эволюцию состояния земной климатической системы и вариации факторов космического окружения [8, 9].

Одним из важнейших временных масштабов для понимания динамики ГЭЦ является суточный масштаб. Суточные вариации приземного поля хорошей погоды и ИП обсуждаются уже более 100 лет. При этом измерения приземного поля на масштабе суток подвержены воздействию множества локальных факторов, поэтому при анализе суточной вариации этого поля

обычно прибегают к усреднению по достаточно большому количеству дней.

Важная веха в исследовании суточной вариации параметров ГЭЦ — измерения электрического поля на корабле «Карнеги» в 1915–1929 гг. [10]; обзор и анализ этих измерений с современной точки зрения можно найти в работе [11]. Главный результат, полученный в ходе этих исследований, состоит в том, что усредненная кривая зависимости электрического поля от абсолютного времени имеет приблизительно одинаковый вид для различных точек земной поверхности [12–17]; впоследствии эта кривая получила название кривой Карнеги.

Традиционная интерпретация кривой Карнеги основана на отмеченной корреляции данной кривой (то есть графика усредненной суточной вариации приземного поля хорошей погоды) с графиком суточной вариации глобальной грозовой активности [18, 19]. Такая корреляция является одним из важных подтверждений справедливости концепции ГЭЦ, в которой распределение полей и токов во всей атмосфере поддерживается в первую очередь грозowymi генераторами. Данные, получаемые с использованием более современных методов (в частности, спутниковых и самолетных измерений), подтверждают этот вывод [20, 21].

За прошедшие десятилетия проведены многочисленные экспериментальные кампании по измерению приземного электрического поля в разных частях планеты [22–27]. В ходе экспериментов было получено, что для суточной вариации характерно наличие одного (в вечерние часы всемирного координированного времени — UTC) или двух (в вечерние и утренние часы UTC) максимумов. Уже ранние исследования в различных географических районах показали, что вид суточной вариации электрического поля существенно зависит от времени года [28–29].

С точки зрения математической модели ГЭЦ распределение полей и токов в атмосфере определяется распределением проводимости и распределением плотности тока зарядки в грозowych облаках (также иногда в граничных условиях учитываются источники ионосферной природы, но в данной работе они не рассматриваются); при этом распределение плотности тока зарядки выступает в роли источника в уравнениях, описывающих ГЭЦ [30–32]. Так как эти уравнения линейны, большинство измеряемых параметров ГЭЦ (плотность тока или поле в некоторой точке в области хорошей погоды, ИП) прямо про-

порциональны плотности тока зарядки; в то же время элементарные оценки показывают, что к возмущениям проводимости ИП и другие параметры, как правило, менее чувствительны [33]. Более того, поскольку наиболее существенные глобальные возмущения проводимости в атмосфере связаны с солнечной активностью и, как правило, имеют достаточно большой (11-летние солнечные циклы) или достаточно малый (солнечные вспышки) временной масштаб, то при усреднении по интервалам времени от месяца до года можно считать, что суточная вариация параметров ГЭЦ определяется именно динамикой источников, а не динамикой проводимости.

Таким образом, теоретическое моделирование суточной вариации параметров ГЭЦ во многом сводится к моделированию динамики облаков с развитой электрической структурой в масштабе всей Земли. Реалистичное решение подобной задачи невозможно без численного моделирования общей циркуляции атмосферы, однако существующие в настоящее время модели общей циркуляции атмосферы не учитывают электрические процессы. В то же время для численного анализа вариации параметров ГЭЦ учет электричества необходим, поскольку в роли источников выступают только облака с развитой электрической структурой (в частности грозовые), поэтому подобные задачи представляют существенную трудность и лишь недавно начали обсуждаться в литературе.

Впервые суточная вариация ГЭЦ была промоделирована в модели общей циркуляции атмосферы в работе [9]. Авторы разработали для климатической модели INMCM (Institute of Numerical Mathematics Coupled Model) параметризацию вкладов от ячеек расчетной сетки в ИП в предположении экспоненциального роста проводимости с высотой. Форма полученной в результате кривой суточной вариации ИП хорошо согласуется с формой классической кривой Карнеги. Также попытки моделирования суточной вариации параметров ГЭЦ принимались в работах [34, 35].

В работе [36] были получены дальнейшие результаты в этом направлении на основе обобщения параметризации из работы [9] для численной модели прогноза погоды WRF (Weather Research and Forecasting Model). В отличие от климатических, прогнозные модели позволяют более детально воспроизвести динамику основных параметров атмосферы (температура, давление, плотность, влажность, скорость ветра), что

дает возможность максимально правдоподобно воспроизвести любой заданный день по всей Земле. Это позволило, в частности, получить лучшее, чем в других работах, согласие с классической кривой Карнеги и оценить вклады различных регионов земной поверхности в динамику ИП на суточном масштабе.

Основная цель данной работы — моделирование сезонной динамики суточной вариации ИП. Такая задача до сих пор не анализировалась в полном объеме, однако представляет существенный интерес для исследований атмосферного электричества, поскольку наблюдения свидетельствуют о том, что кривая суточной вариации параметров ГЭЦ в течение года претерпевает заметные изменения, а классическая кривая Карнеги описывает лишь некоторую усредненную картину [17].

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ

Модель WRF-ARW (Advanced Research WRF, далее — WRF) — это негидростатическая численная модель динамики атмосферы, которая может использоваться для решения как прогнозных, так и исследовательских задач [37–39]. К числу преимуществ этой модели можно отнести открытый код в свободном доступе, большое количество пользователей (что позволяет считать модель верифицированной) и большое количество разработанных для нее параметризаций различных физических процессов.

Для настоящего исследования модель WRF (версия 3.9.1) применялась в режиме глобального моделирования. Поскольку решатель модели работает в декартовой системе координат, для расчетов атмосфера отображается в параллелепипед на основе широтно-долготной сетки с несколькими уровнями по высоте; при этом на двух границах, соответствующих нулевому меридиану, ставятся периодические граничные условия, а в окрестности полюсов используется фильтрация.

Для расчетов используется сетка с масштабом $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе и с 51 уровнем по высоте от поверхности Земли до высоты, соответствующей давлению в 10 мбар; шаг по времени составляет 150 с. Используется параметризация микрофизики Lin (Purdue) [40] и параметризация конвекции Betts–Miller–Janjić [41, 42]: эти параметризации, во-первых, широко распространены в моделировании на больших масштабах, а во-вторых, показали себя наиболее

устойчивыми в численных экспериментах данного исследования. Полный набор использованных при моделировании параметров:

MP_PHYSICS = 2, RA_LW_PHYSICS = 4,
RA_SW_PHYSICS = 4, RADT = 30,
SF_SFCLAY_PHYSICS = 1,
SF_SURFACE_PHYSICS = 2,
BL_PBL_PHYSICS = 1, CU_PHYSICS = 2.

В качестве начальных значений использовались данные реанализа модели GFS (Global Forecast System) на основе данных наблюдений из глобальной системы GDAS (Global Data Assimilation System), а именно набор данных NCEP GDAS/FNL 0.25 (National Centers for Environmental Prediction final operational global analysis and forecast data on $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ grids) [43]. Система усвоения GDAS позволяет использовать максимально полные данные о состоянии атмосферы по всей Земле с интервалом в 6 часов (в 0:00, 6:00, 12:00, 18:00 UTC).

Наиболее достоверные результаты расчетов модели WRF достигаются в интервале от 12 до 48 часов с момента инициализации. Результаты за первые 12 часов (время установления) ненадежны, ибо модель только выходит на режим корректного воспроизведения данных, которые отсутствуют в начальных условиях, например осадков, облачности, вертикальной скорости ветра и т.п. Результаты расчетов после 48 часов использовать нецелесообразно ввиду накопления ошибок, которому подвержены параметризации всех подсеточных процессов. Более точные результаты могут быть получены посредством нового расчета с начальными данными, соответствующие более позднему моменту времени.

Для данного исследования было проведено 1462 расчета длительностью по 48 часов с временами инициации 00 и 12 UTC с 31 декабря 2015 г. по 30 декабря 2017 г. включительно, что дало полную картину состояния атмосферы за 2016–2017 гг. Выбор двухгодичного периода обусловлен тем, что такой временной масштаб более чем достаточен для исследования усредненной суточной картины, позволяя при этом исследовать сезонные тренды, и в тоже время глобальное распределение проводимости (в значительной мере подверженное влиянию 11-летних циклов солнечной активности) изменяется на этом масштабе не слишком сильно, так что вариацией проводимости можно пренебречь. Выбор также отчасти связан с тем, что наиболее полные и точные данные NCEP

GDAS/FNL 0.25 (на сетке $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) стали доступны только с середины 2015 г.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Параметризация ионосферного потенциала для модели WRF подробно описана в работе [36]; здесь мы приводим лишь краткое ее описание. Решение уравнений, описывающих стационарное состояние ГЭЦ простейшим образом, позволяет однозначно определить по заданным распределениям проводимости σ и плотности тока разделения зарядов j^s значение ИП [31]. В случае если рельеф земной поверхности не принимается в расчет и проводимость зависит только от высоты z , значение V ИП можно вычислить аналитически [31]:

$$V = \int_0^{h_{\text{atm}}} \frac{1}{4\pi\sigma(z)} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} j_z^s(z, \lambda, \psi) \cos \lambda d\lambda d\psi dz,$$

где h_{atm} — высота модельной атмосферы, а λ и ψ — соответственно широтный и долготный углы, выраженные в радианах.

Чтобы параметризовать величину ИП в модели WRF, делаются следующие предположения:

1) верхняя (z_i^{top}) и нижняя (z_i^{bot}) границы области смешанной фазы (области одновременного присутствия воды в жидком и твердом состояниях) в облаках в i -ой ячейке модели определяются изотермами -38°C и 0°C соответственно;

2) отношение площади, занятой облаками в i -ой ячейке, к полной площади этой ячейки прямо пропорционально коэффициенту $\alpha_i = P_i / W_i$, где P_i — количество осадков, выпавших в течение двух часов (за час до и час после времени расчета ИП), а W_i — количество запасенной влаги (то есть полная масса водяного пара, содержащегося в столбе);

3) вклад в ионосферный потенциал дают только ячейки, занятые облаками с развитой конвекцией, которые определяются как те ячейки, где доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE, convective available potential energy) больше 1000 Дж/кг;

4) высотный профиль проводимости описывается экспоненциальным законом, а именно $\sigma(z) = \sigma_0 \exp(z/H)$ с вертикальным масштабом $H = 6$ км.

Вычисляя интеграл по z при сделанных предположениях, легко получить следующую формулу для ионосферного потенциала:

$$V = \sum_i \frac{j_0 HS_i}{\sigma_0 S_E} \frac{P_i}{W_i} \left(\exp\left(-\frac{z_i^{\text{bot}}}{H}\right) - \exp\left(-\frac{z_i^{\text{top}}}{H}\right) \right) \times \begin{cases} 0, & \text{CAPE}_{(i)} < 1000, \\ 1, & \text{CAPE}_{(i)} \geq 1000, \end{cases}$$

где j_0 — плотность тока зарядки в электрически активных облаках, S_i — площадь i -ой ячейки, $\text{CAPE}_{(i)}$ — доступная конвективная потенциальная энергия в i -ой ячейке, S_E — полная площадь поверхности Земли, а суммирование производится по всем горизонтальным ячейкам модельной сетки.

При выборе значения параметра j_0 следует отметить, что в литературе нет достаточных сведений об экспериментальном определении характерных значений токов зарядки в грозовых облаках. В натуральных экспериментах, как правило, измеряется ток над облаками [21], который может заметно отличаться от тока зарядки, причем их отношение зависит от особенностей режима работы грозового генератора [44]. Конкретное значение j_0 в модельных задачах следует подбирать из соображений реалистичности глобальных параметров, таких как абсолютное значение ИП. Поскольку в данной работе анализируются вариации относительно среднего значения, конкретное значение j_0 , как и значение σ_0 , не столь важно.

Приведенное выше выражение, позволяющее рассчитать ионосферный потенциал, использует модельные данные об осадках, запасенной влаге и доступной конвективной потенциальной энергии, которые в общем случае не обязаны иметь суточную периодичность; как следствие, рассчитанные значения ИП также оказываются лишь квазипериодическими. Модель WRF, как и любая другая численная модель динамики атмосферы, может как недооценивать, так и переоценивать суммарные осадки, накапливать ошибки и т.д. Поэтому для согласования значений ИП на границах суток (интервал в 24 часа) для каждого модельного расчета используется следующая процедура регуляризации:

1) Расчетные данные за период от 0 до 18 модельных часов не используются;

2) На интервале от 18 до 42 часов проводится линейная корректировка ИП с сохранением среднего, после которой значения ИП в 18 и 42 часа становятся равными друг другу [36];

3) Вариация ИП за выбранный день получается усреднением по двум расчетам, стартующим в 00 UTC и в 12 UTC предыдущего дня;

В силу линейности процедур корректировки и вычисления среднего суточная вариация ИП сохранит периодичность при усреднении по любому числу дней.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИИ ИОНОСФЕРНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Суточная вариация ИП

Моделируя суточную вариацию ИП, мы ожидаем воспроизвести классическую кривую Карнеги [11] с одним вечерним максимумом. На рис. 1 (вверху) показаны модельные суточные вариации ИП за 2016–2017 гг., нормированные на среднегодовые значения, полученные с помощью описанной процедуры моделирования и регуляризации. Видно, что форма кривых хорошо согласуется с кривой Карнеги (рис. 1, внизу), хотя и имеет меньшую амплитуду вариации. Более того, кривые за различные годы практически полностью повторяют друг друга; это позволяет утверждать, что данная параметризация ИП воспроизводит базовые характеристики генераторов ГЭЦ. Недостаточная амплитуда вариации, скорее всего, связана с невозможностью отделить на данных масштабах моделирования ($1^\circ \times 1^\circ$) электрически активные облака от неэлектрических при одина-

ковых параметрах конвекции и осадков ((CAPE), P_i , W_i) в модельной ячейке. Тем не менее полученный вид суточной вариации ИП наилучшим образом соответствует кривой Карнеги по сравнению с вариациями, воспроизводимыми другими моделями «из первых принципов» [9, 33, 35].

Годовая вариация ИП

Вопрос исследования годовой вариации ГЭЦ много раз поднимался в литературе (см., например, [28, 29]), но при этом до сих пор нет общепринятой точки зрения относительно основных трендов ее изменения. Это объясняется тем фактом, что устойчивую годовую изменчивость имеет концентрация аэрозолей и связанная с ней приземная проводимость. Значительные сезонные изменения в аэрозольной концентрации и локальной проводимости имеют тенденцию «затенять» годовую вариацию ИП, определяемую на основе измерений приземного поля. При этом экспериментальные кампании по исследованию непосредственно сезонной вариации ионосферного потенциала еще не проводились. В ранних исследованиях [28] годовая вариация приземного поля имеет выраженный минимум в летний период Северного полушария, в то время как анализ с учетом изменчивости проводимости [29] выявил обратную тенденцию для ИП: летние среднемесячные значения ИП достигают больших значений по сравнению с зимним периодом.

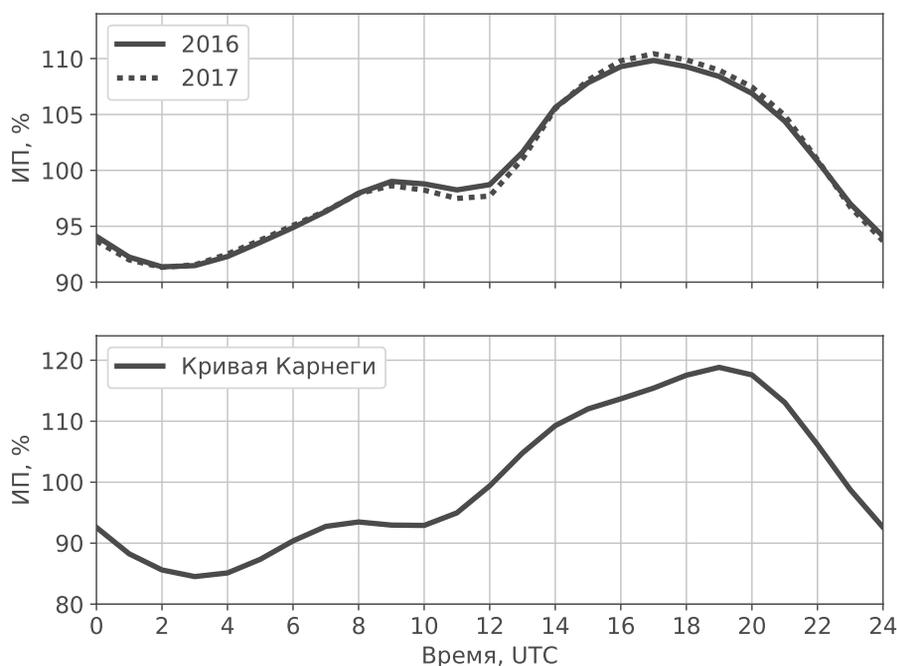


Рис. 1. Суточная вариация ионосферного потенциала (ИП), нормированного на среднегодовые значения (вверху) и классическая кривая Карнеги по данным [11] (внизу).

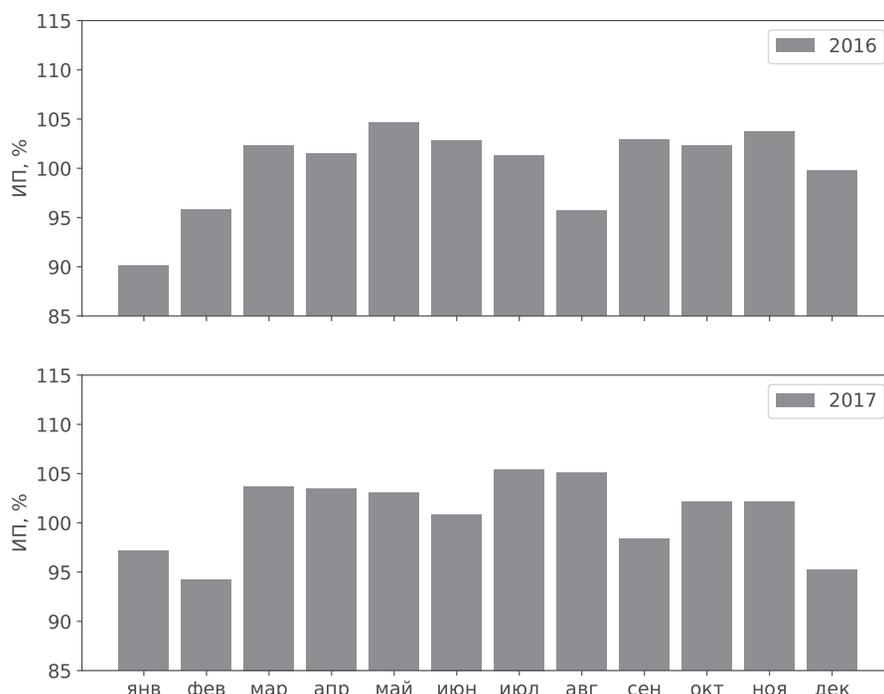


Рис. 2. Годовая вариация ионосферного потенциала (ИП), нормированного на среднегодовые значения.

В данной работе мы моделируем годовую вариацию ИП с помощью численной модели динамики атмосферы, максимально точно воспроизводящей состояние атмосферы для каждого суток выбранного периода. На рис. 2 показана вариация за 2016–2017 гг., нормированная на среднегодовые значения. Видно, что годовая вариация не является «инвариантом», повторяющимся из года в год; при этом заметна тенденция к понижению значения ИП в зимний период Северного полушария и более высокому значению в весенне-летний период, что согласуется с анализом, проведенным в работе [29].

Годовой ход суточной вариации ИП

Одним из наиболее интересных вопросов в области исследования ГЭЦ до сих пор остается вопрос о характере и причинно-следственных связях сезонных изменений суточной вариации ИП и, как следствие, суточной вариации приземного поля хорошей погоды, неоднократно наблюдавшихся в том числе и в первых экспериментах на корабле «Карнеги».

На рис. 3 показаны модельные суточные вариации ИП, усредненные по месяцам за период 2016–2017 гг. и нормированные на свои среднемесячные значения. В очередной раз следует отметить хорошую повторяемость кривых для двух различных годов, что является дополнительным косвенным свидетельством адекватности предложенной параметризации. На рисунке хорошо

видны основные сезонные тренды. Так, в зимний период Северного полушария вариация ИП характеризуется одним сильно выделенным максимумом в районе 16–18 UTC, величина которого достигает 120% от среднего значения. В летний период Северного полушария вариация имеет два максимума в 8–9 UTC и в 18–20 UTC, при этом их величина значительно снижена до значения в 106–108% от среднего. Для весеннего и осеннего периодов характерны смены режимов от одного максимума к двум и наоборот.

Такой годовой ход согласуется с результатами экспериментальной кампании по измерению приземного электрического поля в Антарктиде в период 2006–2011 гг., описанной в работе [17]. В ходе этой кампании, в частности, было установлено, что суточная вариация поля в зимний период Северного полушария действительно характеризуется основным и единственным максимумом в 18 UTC величиной до 130% от среднего значения, в то время как в летний период также наблюдается дополнительный, но слабо выраженный максимум в районе 8–9 UTC, а основной смещается к 21 UTC с одновременным снижением величины до 110–115% от среднего.

Следует отметить, что предложенная параметризация и техника моделирования позволили максимально точно воспроизвести как время максимумов, так и их сезонную изменчивость; более того, правильно предсказан основной

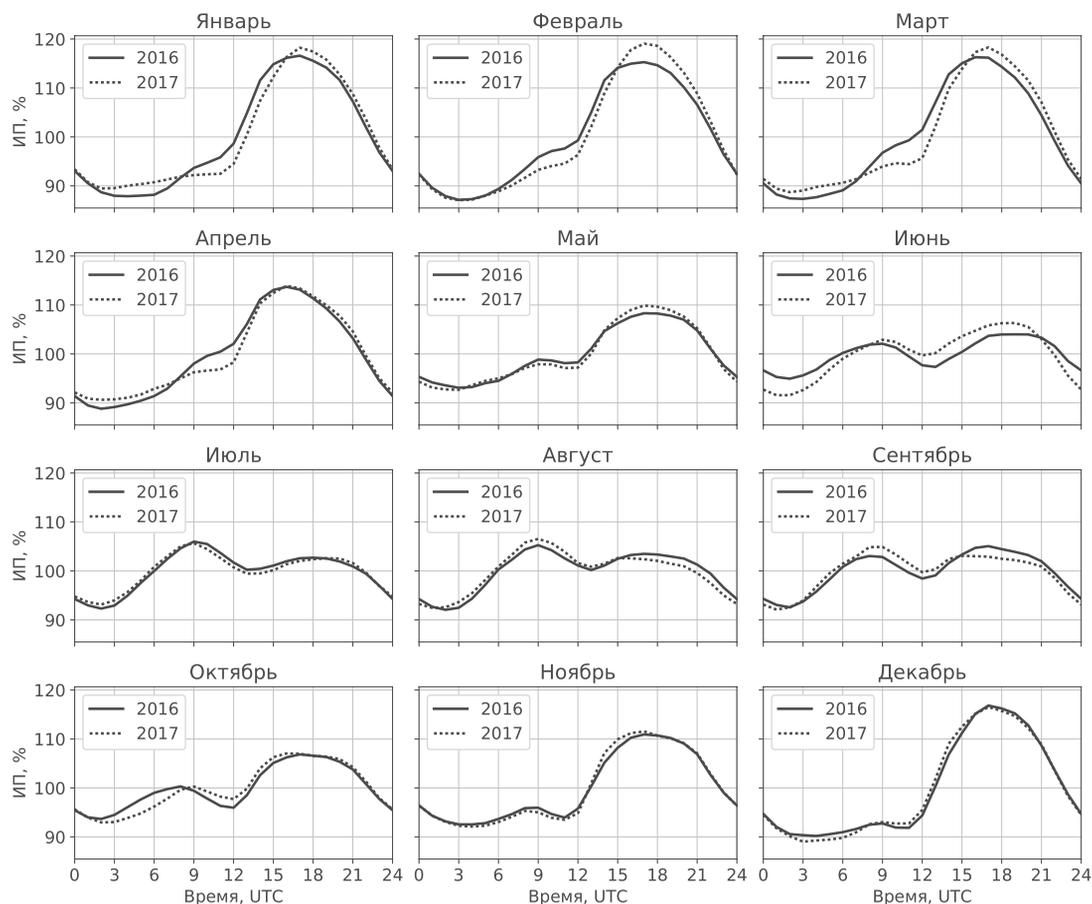


Рис. 3. Годовой ход суточной вариации ионосферного потенциала (ИП), нормированного на среднемесячные значения.

тренд к уменьшению амплитуды вариации в летний период. Основные отличия результатов моделирования от данных наблюдений связаны с недооценкой амплитуды вариации основного максимума (в вечерние часы UTC). Поскольку этот максимум в первую очередь определяется вкладом от электрически активных облаков над Южной Америкой, то, по-видимому, на этом континенте имеет место региональная особенность работы генераторов ГЭЦ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе предложенной параметризации ИП промоделирована динамика суточной вариации ИП с использованием численной модели прогноза погоды WRF-ARW в глобальном режиме за период 2016–2017 гг. Суточная вариация ИП, усредненная за разные годы, показывает хорошее соответствие с классической кривой Карнеги, позволяя утверждать, что предложенная параметризация воспроизводит базовые характеристики генераторов ГЭЦ. Годовая вариация ИП не имеет строгой повторяемости от года

к году, при этом в зимние периоды Северного полушария отмечается пониженное значение ИП, а в летние — повышенное.

Годовой ход суточной вариации ИП демонстрирует устойчивые тренды зимнего и летнего сезонов, причем зимний сезон Северного полушария характеризуется только одним сильно выделенным максимумом в районе 16–18 UTC величиной в 120% от среднего значения, в то время как в летний сезон кривая суточной вариации имеет два максимума заметно меньшей величины (~107% от среднего): утренний в 8–9 UTC и вечерний в 16–20 UTC. Модельный годовой ход суточной вариации ИП согласуется с данными экспериментальной кампании по измерению приземного поля в Антарктиде в период 2006–2011 гг.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.А. Марееву за плодотворные дискуссии при обсуждении результатов моделирования.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10061).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимов С.В., Мареев Е.А.* Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. 2008. № 10. С. 8–18.
2. *Мареев Е.А.* Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180. № 5. С. 527–534.
3. *Rycroft M.J., Harrison R.G., Nicoll K.A., Mareev E.A.* An overview of Earth's global electric circuit and atmospheric conductivity // Space Sci. Rev. 2008. V. 137. № 1–4. P. 83–105.
4. *Tinsley B.A.* The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics // Rep. Progr. Phys. 2008. V. 71. № 6. P. 066801.
5. *Williams E.R.* The global electrical circuit: A review // Atmos. Res. 2009. V. 91. № 2–4. P. 140–152.
6. *Williams E., Mareev E.* Recent progress on the global electrical circuit // Atmos. Res. 2014. V. 135–136. P. 208–227.
7. *Markson R., Ruhnke L.H., Williams E.R.* Global scale comparison of simultaneous ionospheric potential measurements // Atmos. Res. 1999. V. 51. № 3–4. P. 315–321.
8. *Markson R.* The global circuit intensity: Its measurement and variation over the last 50 years // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2007. V. 88. № 2. P. 223–241.
9. *Mareev E.A., Volodin E.M.* Variation of the global electric circuit and ionospheric potential in a general circulation model // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. № 24. P. 9009–9016.
10. *Torreson O.W., Parkinson W.C., Gish O.H., Wait G.R.* Ocean Atmospheric-Electric Results (Scientific Results of Cruise VII of the Carnegie during 1928–1929 under Command of Captain J.P. Ault, Oceanography – III). Washington, D.C.: Carnegie Institution of Washington, 1946. 178 pp.
11. *Harrison R.G.* The Carnegie curve // Surv. Geophys. 2012. V. 34. № 2. P. 209–232.
12. *Mauchly S.J.* Note on the diurnal variation of the atmospheric-electric potential-gradient // In: Proceedings of the American Physical Society. Phys. Rev. 1921. V. 18. № 2. P. 161–162.
13. *Mauchly S.J.* On the diurnal variation of the potential gradient of atmospheric electricity // Terr. Magn. Atmos. Electr. 1923. V. 28. № 3. P. 61–81.
14. *Mühleisen R.* The global circuit and its parameters // In: Electrical Processes in Atmospheres, ed. by Dolezalek H., Reiter R. P. 467–476. Darmstadt: Steinkopff, 1977.
15. *Markson R.* Tropical convection, ionospheric potentials and global circuit variation // Nature. 1986. V. 320. № 6063. P. 588–594.
16. *Harrison R.G.* Twentieth century atmospheric electrical measurements at the observatories of Kew, Eskdalemuir and Lerwick // Weather. 2003. V. 58. № 1. P. 11–19.
17. *Burns G.B., Frank-Kamenetsky A.V., Tinsley B.A., French W.J.R., Grigioni P., Camporeale G., Bering E.A.* Atmospheric global circuit variations from Vostok and Concordia electric field measurements // J. Atmos. Sci. 2017. V. 74. № 3. P. 783–800.
18. *Whipple F.J.W.* On the association of the diurnal variation of electric potential gradient in fine weather with the distribution of thunderstorms over the globe // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1929. V. 55. № 229. P. 1–18.
19. *Whipple F.J.W., Scrase F.J.* Point Discharge in the Electric Field of the Earth: An Analysis of Continuous Records Obtained at Kew Observatory. Geophysical Memoirs. № 68. London: H.M. Stationery Off., 1936. 20 pp.
20. *Liu C., Williams E.R., Zipser E.J., Burns G.* Diurnal variations of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electrical circuit // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67. № 2. P. 309–323.
21. *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. V. 116. № D5. D05201.
22. *Tacza J., Raulin J.-P., Macotela E., Norabuena E., Fernandez G., Correia E., Rycroft M.J., Harrison R.G.* A new South American network to study the atmospheric electric field and its variations related to geophysical phenomena // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2014. V. 120. P. 70–79.
23. *Nicoll K.A., Harrison R.G., Barta V., Bor J., Brugge R., Chillingarian A., Chum J., Georgoulas A.K., Guha A., Kourtidis K., Kubicki M., Mareev E., Matthews J., Mkrtychyan H., Odzimek A., Raulin J.-P., Robert D., Silva H.G., Tacza J., Yair Y., Yaniv R.* A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2019. V. 184. P. 18–29.
24. *Gołkowski M., Kubicki M., Cohen M., Kułak A., Inan U.S.* Estimation of global lightning activity and observations of atmospheric electric field // Act. Geophys. 2011. V. 59. № 1. P. 183–204.
25. *Matthews J.C., Wright M.D., Clarke D., Morley E.L., Silva H., Bennett A.J., Robert D., Shallcross D.E.* Urban and rural measurements of atmospheric potential gradient // J. Electrostat. 2019. V. 97. P. 42–50.
26. *Торопов А.А., Козлов В.И., Каримов Р.Р.* Вариации атмосферного электрического поля по наблюдениям в Якутске // Наука и образование. 2016. № 2. С. 58–65.
27. *Anisimov S. V., Shikhova N.M.* Research of an electric component of middle-latitude region climate // Russian J. Earth Sci. 2009. V. 11. № 2. P. 1–7.
28. *Whipple F.J.W.* Potential gradient and atmospheric pollution: The influence of “summer time” // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2007. V. 55. № 232. P. 351–362.
29. *Adlerman E.J., Williams E.R.* Seasonal variation of the global electrical circuit // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № D23. P. 29679–29688.
30. *Hays P.B., Roble R.G.* A quasi-static model of global atmospheric electricity: 1. The lower atmosphere // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № A7. P. 3291–3305.

31. Калинин А.В., Слюняев Н.Н., Мареев Е.А., Жидков А.А. Стационарные и нестационарные модели глобальной электрической цепи: корректность, аналитические соотношения, численная реализация // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 355–364.
32. Bayona V., Flyer N., Lucas G. M., Baumgaertner A.J.G. A 3-D RBF-FD solver for modeling the atmospheric global electric circuit with topography (GEC-RBFFD v1.0) // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. № 10. P. 3007–3020.
33. Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Zhidkov A.A. On the variation of the ionospheric potential due to large-scale radioactivity enhancement and solar activity // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. № 8. P. 7060–7082.
34. Lucas G.M., Baumgaertner A.J.G., Thayer J.P. A global electric circuit model within a community climate model // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. V. 120. № 23. P. 12054–12066.
35. Jánský J., Lucas G.M., Kalb C., Bayona V., Peterson M.J., Deierling W., Flyer N., Pasko V.P. Analysis of the diurnal variation of the global electric circuit obtained from different numerical models // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. 122. № 23. P. 12906–12917.
36. Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A. Modeling contributions of continents and oceans to the diurnal variation of the global electric circuit // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL083166> (accepted manuscript).
37. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
38. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J.G. A description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. 2008.
39. Powers J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A., Dudhia J., Gill D.O., Coen J.L., Gochis D.J., Ahmadov R., Peckham S.E., Grell G.A., Michalakes J., Trahan S., Benjamin S.G., Alexander C.R., Dimego G.J., Wang W., Schwartz C.S., Romine G.S., Liu Z., Snyder C., Chen F., Barlage M.J., Yu W., Duda M.G. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, system efforts, and future directions // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2017. V. 98. № 8. P. 1717–1737.
40. Lin Y., Farley R.D., Orville H.D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model // J. Climate Appl. Meteor. 1983. V. 22. № 6. P. 1065–1092.
41. Janjić Z.I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes // Mon. Wea. Rev. 1994. V. 122. № 5. P. 927–945.
42. Janjić Z.I. Comments on “Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models” // J. Atmos. Sci. 2000. V. 57. № 21. P. 3686–3686.
43. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3>
44. Слюняев Н.Н., Жидков А.А. О параметризации источников глобальной электрической цепи // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 3. С. 223–242.

Simulation of Seasonal Dynamics of the Global Electric Circuit Diurnal Variation

N. V. Ilin, M. V. Shatalina, N. N. Slyunyaev

Institute of Applied Physics RAS

Ulyanova st., 46, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

e-mail: ilyin@ipfran.ru

Received: 03.04.2019

Accepted: 29.05.2019

Based on the ionospheric potential (IP) parameterization, the seasonal dynamics of the diurnal variation of IP for 2016–2017 were modeled for the first time using the numerical weather forecast model WRF-ARW. The diurnal variation of the IP, averaged over the annual simulation periods, shows good agreement with the classical Carnegie curve. The proposed parametrization correctly reproduces the basic characteristics of the stationary global electric circuit generators. The annual variation does not show a precise repeatability from year to year, but in the winter season of the Northern Hemisphere a lower IP value was obtained, and in the summer - an increased one. The model diurnal variation demonstrates stable seasonal trends, and in the northern hemisphere, the variation is characterized by only one strongly distinguished maximum IP in the 16–18 UTC area of ~120% of the average value, while in the summer season the daily variation curve has two maxima with smaller value (~ 107% of average): morning at 8–9 UTC and evening at 18–20 UTC. The model annual variation of the diurnal variation agrees with the experimental data of the surface field measuring in Antarctica in the period 2006–2011. The proposed parametrization and modeling technique made possible the accurate reproduction of the IP variation maximums times, their seasonal variability, and decreasing of the amplitude of variation in the summer period of the Northern Hemisphere.

Keywords: global electric circuit, ionospheric potential, modeling.