
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НА ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ИОНОСФЕРЫ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ВОЗМУЩЕННЫМ СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ METEOROLOGICAL RESPONSE TO CHANGES IN IONOSPHERIC ELECTRIC POTENTIAL CAUSED BY DISTURBED SOLAR WIND

А.А. Караханян

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, asha@iszf.irk.ru*

С.И. Молодых

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sim@iszf.irk.ru*

A.A. Karakhanyan

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, asha@iszf.irk.ru*

S.I. Molodykh

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sim@iszf.irk.ru*

Аннотация. Электрический потенциал (ЭП) ионосферы используется в качестве характеристики солнечного воздействия для определения тропосферного отклика во время мощных возмущений. Проведено сопоставление расчетов ЭП, выполненных по версиям 2001 и 2005 г. модели Веймера. Выявлены различия в пространственном распределении ЭП во время мощных геомагнитных бурь в рассмотренных моделях. Представлено поведение аномалий ЭП и контраста ЭП, усредненных для высокоширотной области. Контраст ЭП представляет собой разность аномалий ЭП, усредненных по областям одного знака. Обнаружено, что изменения аномалий ЭП различаются в разных версиях модели, тогда как вариации контраста ЭП, рассчитанные по разным версиям, ведут себя синхронно во время возмущений. Корреляционный анализ изменений усредненного контраста ЭП с вариациями геомагнитного индекса *PC* показал, что обе характеристики можно использовать в качестве индикатора солнечной активности для изучения изолированных мощных магнитных бурь. Во время возмущений увеличение контраста ЭП сопровождается ростом контраста метеопараметров, особенно контраста верхней облачности.

Ключевые слова: электрический потенциал ионосферы, мощная геомагнитная буря, геомагнитный индекс, уходящая длинноволновая радиация, облачность, водяной пар, климат.

Abstract. The ionospheric electric potential (EP) is utilized as a characteristic of the solar forcing to determine the tropospheric response during strong disturbances. We compare EP calculations carried out using the 2001 and 2005 versions of the Weimer model. Differences in the spatial distribution of EP during geomagnetic superstorms have been revealed for the models considered. The behavior of EP anomalies and contrast averaged over high latitudes is shown. The EP contrast is the difference between EP anomalies averaged over regions of the same sign. It has been found that changes in EP anomalies differ in different versions of the model, whereas EP contrast variations, calculated by both versions, behave synchronously during disturbances. Correlation analysis of variations in the averaged EP contrast with variations in the *PC* geomagnetic index has shown that both can be used as indicators of solar activity to study individual geomagnetic superstorms. An increase in the EP contrast is accompanied by an increase in the contrast of the meteorological parameters, in particular in the contrast of high clouds during disturbances.

Keywords: ionospheric electric potential, geomagnetic superstorm, geomagnetic index, outgoing longwave radiation, cloud, water vapor, climate.

ВВЕДЕНИЕ

Вторая волна потепления климата за инструментальный период наблюдений, начавшаяся в 1970-х гг. и усилившаяся в 1990-х гг., в настоящее время проявляется в резком увеличении количества опасных явлений на планете [Мохов, 2023; <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>]. Одной из возможных причин происходящих климатических изменений является воздействие солнечной активности на атмосферу Земли. Отсутствие прямого механизма влияния солнечной активности на нижнюю атмосферу привело к поиску опосредованного механизма воздействия солнечных

процессов на приходящую часть радиационного баланса. Источниками солнечного влияния являются: коротковолновое и УФ-излучение и корпускулярные потоки (ГКЛ, солнечные протонные высыпания, высокоэнергичные частицы). Вследствие их воздействия меняются состояние озонового слоя и глобальной электрической цепи, а также стратотропосферная циркуляция и микрофизика облаков [Mironova et al., 2015; Криволуцкий и др., 2017; Harrison, Lockwood, 2020; Veretenenko et al., 2023a]. Физическая модель, развиваемая в ИСЗФ СО РАН, описывает электромагнитное взаимодействие между компонентами системы магнитосфера—ионосфера—тропосфера. В отличие

от модели Тинсли [Tinsley, 2008], в данной модели изменение оптических свойств водяного пара в ИК-диапазоне, а именно изменение поглощения излучения димерами воды в линиях и континууме водяного пара, приводит к увеличению парникового эффекта, что вызывает динамические изменения в тропосфере. Поскольку водяной пар распределен в пространстве неоднородно, наблюдается неоднородный тропосферный отклик, в том числе в виде образования или перераспределения по высоте облачности, которая уменьшает уходящую длинноволновую радиацию (УДР), тем самым меняя радиационный баланс тропосферы [Молодых и др., 2020].

Подробнее остановимся на описании процесса поглощения водяным паром излучения в ИК-диапазоне. Известно, что инфракрасный спектр поглощения водяного пара состоит из отдельных спектральных линий и расположенных между ними «окон прозрачности» атмосферы. В этих окнах поглощение является слабоселективным, или континуальным, а спектр поглощения представляет собой континуум водяного пара. Поглощение димерами (комплексами из двух молекул) воды является доминирующим фактором в поглощении собственного континуума, т. е. в поглощении водяного пара в чистой атмосфере.

С момента обнаружения континуального поглощения излучения водяным паром проведено большое количество его исследований, в основном в окнах прозрачности ближнего ИК- и видимого диапазонов. Экспериментально установлено, что континуальное поглощение в окне прозрачности 8–12 мкм пропорционально квадрату парциального давления водяного пара и экспоненциально уменьшается с ростом температуры [Пташник, 2015].

Особенности континуума позволяют спектрально различить его на фоне более сильной интенсивности линий поглощения воды, вследствие чего получило развитие восстановление континуума в микроокнах прозрачности между полосами поглощения водяного пара. Механизм, основанный на поглощении излучения димером воды, хорошо объясняет основные температурные и спектральные зависимости континуума водяного пара в полосах поглощения. Свойства димеров воды (энергия диссоциации и время жизни) позволяют их разделить на стабильные, или с-димеры, и метастабильные, или м-димеры, имеющие разные спектральные характеристики. Поглощение стабильных или метастабильных димеров преобладает в континууме поглощения воды в зависимости от термодинамических условий: с-димеры распространены при более низких температурах, а м-димеры — при более высоких температурах. Температура перехода в ту или иную сторону зависит от межмолекулярного потенциала и различна для разных молекулярных пар, например, для димеров воды близка к комнатной температуре. Следовательно, доля стабильных и метастабильных димеров в водяном паре примерно одинакова для атмосферных условий. Модельные расчеты показали, что полумпирическая модель поглощения димера воды лучше воспроизводит экспериментальный внутриполосный собственный континуум в ближнем ИК-диапазоне. Благодаря своей спектральной протяженности (окно

прозрачности в среднем ИК-диапазоне и вклад спектральных участков линий поглощения воды), континуальное поглощение водяного пара может приводить к уменьшению УДР, тем самым оказывая влияние на радиационный баланс климатической системы [Simonova et al., 2022]. Исходя из вышеизложенных представлений, мы провели в данной работе анализ связи вариаций электрического потенциала (ЭП) ионосферы с метеопараметрами (УДР, поглощение излучения водяным паром в окне прозрачности 8–12 мкм, верхняя облачность) для возмущенных условий в межпланетном пространстве.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Наблюдаемые климатические изменения, особенно в высоких широтах, требуют более детального изучения влияния физических процессов, происходящих в околоземном космическом пространстве, на состояние нижней атмосферы. Это необходимо для их параметризации с целью включения в численные модели климата. Индекс геомагнитной активности *PC*, описывающий возмущенность магнитного поля Земли в полярной шапке [Troshichev et al., 1988; <https://pcindex.org/>], ранее использовался нами в качестве прокси солнечной активности для изучения солнечно-тропосферных связей. Данный геомагнитный индекс отражает предполагаемые физические процессы, но при их параметризации возникают следующие недостатки: 1) интегральная характеристика солнечной активности на границе магнитосферы; 2) необходимость включения модели магнитосферы; 3) интегральная характеристика солнечной активности в области ионосферы. Перечисленные недостатки усложняют использование *PC*-индекса из-за неоднородности в пространстве тропосферного отклика на солнечное воздействие. В связи с этим мы выбрали ЭП в качестве оптимальной характеристики солнечного воздействия на тропосферу. Данный гелиогеофизический параметр описывает предполагаемые физические процессы, а применение модели Веймера для его расчета позволяет параметризовать процессы в магнитосфере и получить пространственное распределение ЭП в области ионосферы.

Несколько слов о модели Веймера, которая используется нами для расчета ЭП. Ранее в наших исследованиях применялась версия 2001 г., в данной работе расчеты выполнялись на основе последней версии модели, т. е. версии 2005 г. [Weimer, 2001, 2005]. Остановимся на основных изменениях, внесенных в модель для ее улучшения:

1. Более точные значения поля и более точное местоположение низкоширотной границы конвективного электрического поля.

2. Сферические гармонические функции используются только в пределах небольшой области на полюсе. На более низких широтах потенциалы строятся из нескольких функций рядов Фурье долготы с дискретными широтными шагами, т. е. расчет выполняется по кругу с радиусом, который изменяется в зависимости от параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра с постоянным смещением на 4.2° .

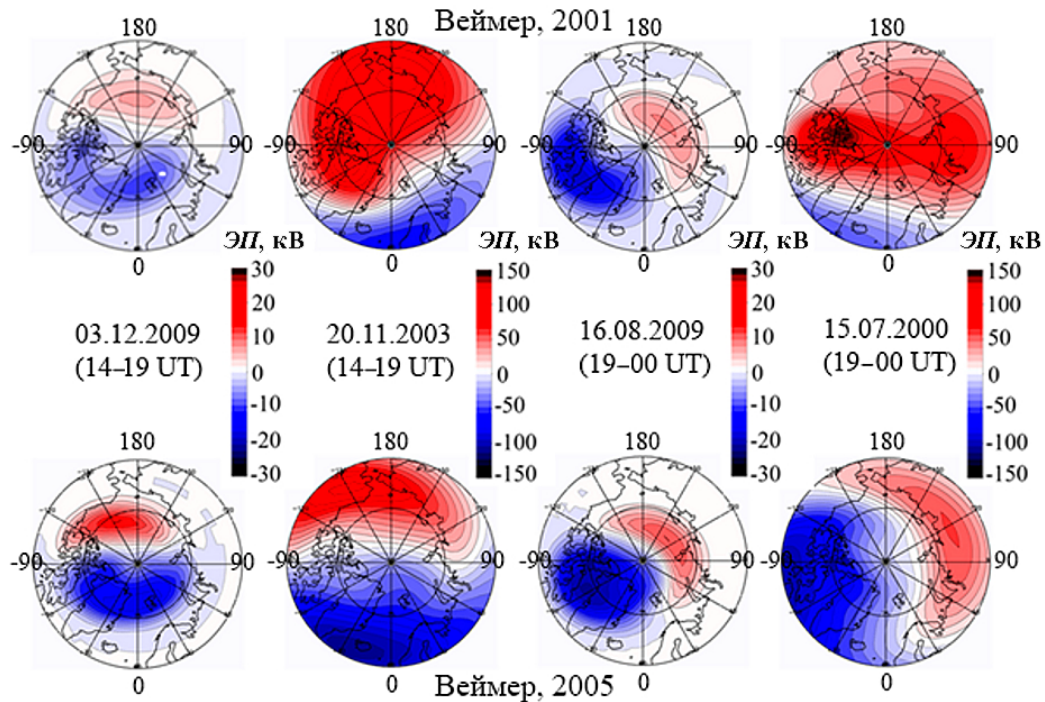


Рис. 1. Пространственные распределения ЭП, рассчитанные с помощью двух версий модели Веймера для спокойных условий 2009 г. и мощных геомагнитных бурь 20.11.2003 и 15.07.2000

3. Нелинейные эффекты насыщения связи солнечного ветра и магнитосферы лучше воспроизводятся для нормальных условий ММП, но необходимо контролировать результаты применения модели к случаям с большими значениями ММП.

На рис. 1 показано пространственное распределение ЭП, рассчитанное для событий 20 ноября 2003 г. (слева) и 15 июля 2000 г. (справа). В качестве спокойного периода выбран 2009 г. На верхней панели представлены расчеты по модели 2001 г., на нижней панели — по модели 2005 г.

Пространственное распределение ЭП для спокойного периода по модели 2005 г. отличается от распределения по модели 2001 г. небольшим увеличением положительного и отрицательного потенциала. Значительные различия в структуре ЭП наблюдаются во время максимума возмущений: в модели 2005 г. наблюдается увеличение как области, так и величины отрицательного потенциала, тогда как по модели 2001 г. больше увеличивается положительный потенциал. Отмеченные различия связаны со смещением зоны конвекции на ночную сторону вследствие улучшений, внесенных в модель 2005 г.

Для дальнейшего анализа в качестве характеристики солнечного воздействия использовался пространственный контраст ЭП. Данный параметр получен следующим образом. На первом шаге по модели Веймера версии 2005 г. [https://zenodo.org/records/2530324] рассчитывалось пространственное распределение аномалий ЭП, структура которого состоит из двух областей: отрицательного и положительного знака. Расчет аномалий ЭП выполнен по формуле

$$\Delta \mathcal{E}P_i = \mathcal{E}P_i - \langle \mathcal{E}P \rangle, \quad (1)$$

где i — номер часа; $\langle \mathcal{E}P \rangle$ — среднее за семь предшествующих суток.

На втором шаге построено пространственное распределение контраста ЭП согласно формуле

$$\Delta \mathcal{E}P_i = \langle \mathcal{E}P_i^+ \rangle - \langle \mathcal{E}P_i^- \rangle, \quad (2)$$

где i — номер часа; $\langle \mathcal{E}P_i \rangle$ — среднее по области одного знака.

Изменения аномалий и контраста ЭП, усредненных для области широт выше 60°N , проанализированы на примере событий 20 ноября 2003 г. и 23 апреля 2023 г. (см. таблицу), спровоцированных классическим корональным выбросом массы. Выбранные очень большие магнитные бури похожи по условиям развития межпланетных возмущений, вследствие которых они наблюдались [Grechnev et al., 2014; Абунина и др., 2024]. Выбор магнитных бурь в разные сезоны позволил также дополнительно учесть сезонные изменения геомагнитной активности с максимумом весной и осенью, которые могут проявляться в изменениях метеопараметров во время возмущений [Karakhanian, Molodykh, 2025].

Расчет ионосферного ЭП по модели Веймера выполнялся на основе часовых данных о солнечном ветре и параметрах ММП, полученных из базы данных OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html]. На основе методики для расчета контраста ЭП рассчитывался также контраст метеопараметров, чтобы провести сравнительный анализ ЭП с метеопараметрами во время возмущений. Мы использовали часовые значения метеовеличин в сетке $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ из набора данных [Wielicki et al., 1996; https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SYN1degEd41Selection.jsp]. Следует отметить, что в тропосфере существует естественный синоптический период

Параметры межпланетной среды во время мощных магнитных бурь

Дата события	$V_{\max}$, км/с	n , см ⁻³	$B_{z_{\max}}$, нТл	B_y , нТл	AL , нТл	Дата и значение Dst , нТл
20–21.11.2003	703	7.6	–50.9	22.5	–1790	20.11.2003, $Dst = -422$ нТл
23–24.04.2023	711*	10.2*	–32.4*	–2.5*	–1015*	24.04.2023, $Dst = -213^*$ нТл

*Предварительные данные [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html; <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>]

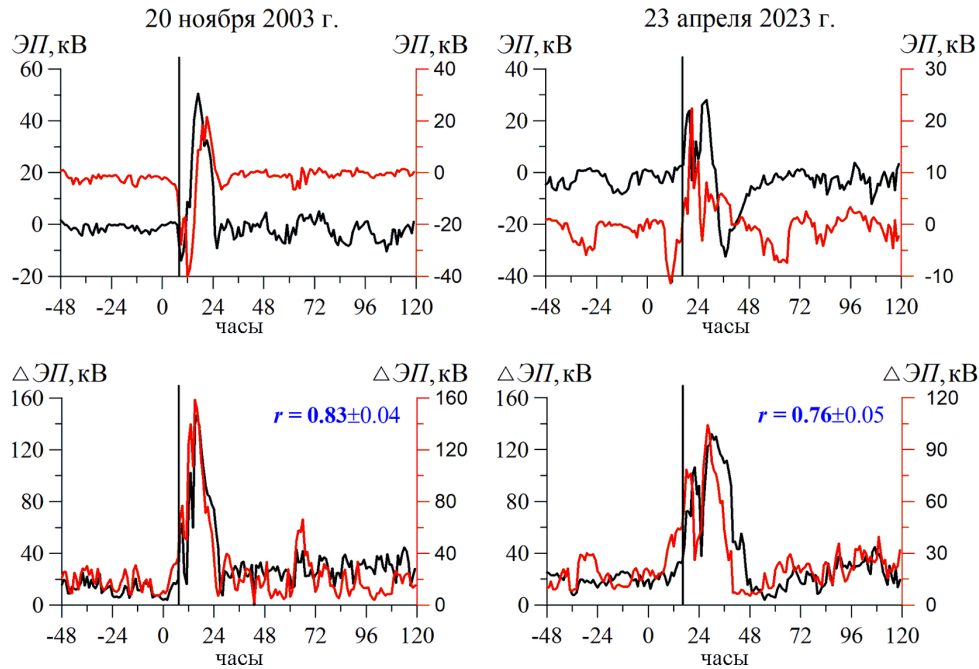


Рис. 2. Изменения во время мощных магнитных бурь аномалий ЭП (сверху) и контраста ЭП (снизу), усредненные для области широт выше 60° N: черная линия — модель Веймера 2001 г., красная линия — модель Веймера 2005 г.; вертикальная линия — начало геомагнитной бури; ноль по оси абсцисс — 00 UT дня начала геомагнитной бури

(ЕСП) — промежуток времени, на котором сохраняется перемещение циклонов/антициклонов и расположение их центров в определенном районе Земли или на всем полушарии (ЕСП ~ 7 сут). Для минимизации влияния синоптических процессов расчет аномалий метеопараметров проводился относительно среднего за семь предшествующих суток до начала события. УДР представлена наблюдаемым CERES широкополосным тепловым потоком на верхней границе тропосферы (высота $h \sim 20$ км); поглощение излучения водяным паром в окне прозрачности 8–12 мкм — излучаемым тепловым потоком ($h \sim 20$ км) инфракрасного атмосферного окна CERES (8–12 мкм). Верхняя облачность характеризуется количеством облаков верхнего яруса (от уровня 300 гПа до тропопаузы) в процентных долях покрытия неба.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Пространственные распределения ЭП во время возмущений (см. рис. 1), полученные с помощью версий модели Веймера 2001 и 2005 гг., существенно различаются.

Проанализируем динамику вариаций ЭП, усредненных для области широт выше 60° N, во время мощных геомагнитных бурь 20 ноября 2003 г. и 23 апреля 2023 г. На рис. 2 представлены измене-

ния аномалий ЭП (верхние панели) и контраста ЭП (нижние панели), рассчитанные с помощью двух версий модели Веймера. Сравнительный анализ показал, что во время мощных магнитных бурь вклад отрицательных значений ЭП в общую изменчивость аномалий ЭП больше в модели 2005 г., чем в модели 2001 г. Данное различие связано с внесенными в модель 2005 г. изменениями, отмеченными ранее. Вариации контраста ЭП во время возмущений, рассчитанные по модели 2001 г., хорошо коррелируют с изменениями контраста ЭП, полученными по модели 2005 г. Поведение контраста ЭП в двух версиях модели Веймера согласуется лучше, чем динамика аномалий ЭП для высокоширотной области.

Рассмотрим линейную связь изменений контраста ЭП, усредненного для области широт выше 60° N, с вариациями геомагнитного индекса PC во время мощных магнитных бурь 20 ноября 2003 г. и 23 апреля 2023 г. Корреляция составляет 0.71 ± 0.5 между изменениями контраста ЭП, рассчитанного по модели Веймера 2001 г., и вариациями PC -индекса для рассматриваемых случаев.

Изменения контраста ЭП, рассчитанные по модели 2005 г., лучше коррелируют с вариациями PC -индекса для анализируемых геомагнитных бурь (рис. 3, верхние панели). Высокий коэффициент корреляции между параметрами позволяет нам говорить о том, что

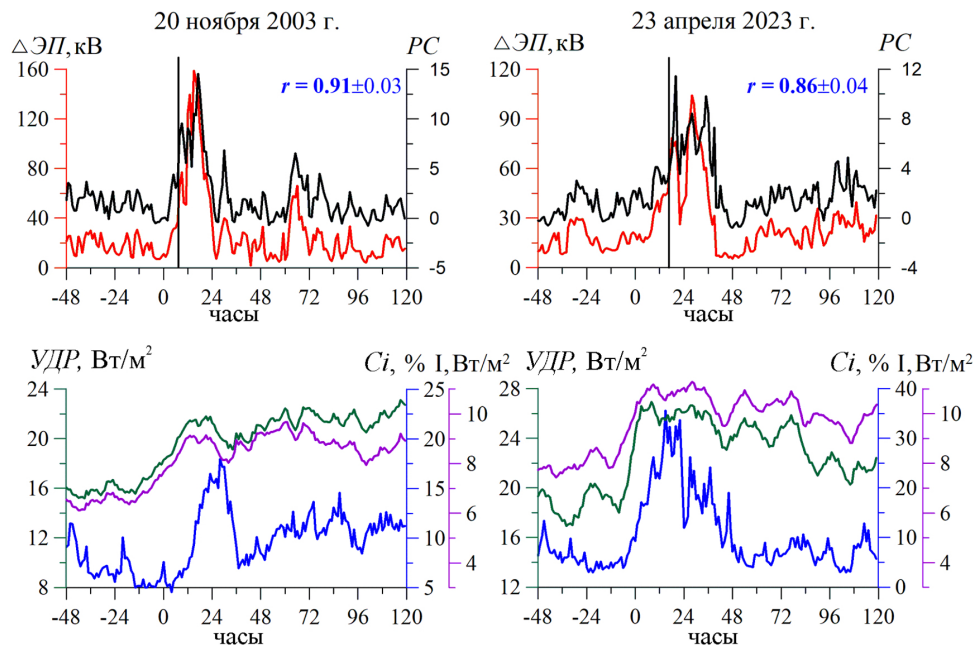


Рис. 3. Усредненные для области широт выше 60° N изменения контраста ЭП (верхние панели, красная линия) и контраста метеопараметров (нижние панели): зеленая линия — УДР; фиолетовая — поглощения излучения водяным паром в окне прозрачности 8–12 мкм (I); синяя — верхней облачности (C_i), а также вариации геомагнитного индекса PC (верхние панели, черная линия) во время мощных магнитных бурь. Вертикальная линия — начало геомагнитной бури; ноль по оси абсцисс — 00 UT дня начала геомагнитной бури

геомагнитный индекс PC можно использовать в качестве индикатора солнечной активности во время изолированных мощных магнитных бурь.

Для определения тропосферного отклика на изменение потенциала во время магнитных бурь использовался контраст ЭП, рассчитанный по модели Вермера 2005 г. (см. рис. 3, вверху). Во время очень сильной магнитной бури 20 ноября 2003 г. увеличение контраста ЭП сопровождается ростом контраста метеопараметров, особенно контраста верхней облачности. Максимум контраста метеопараметров наблюдается в первые 12 ч относительно максимума контраста ЭП. Для геомагнитной бури 23 апреля 2023 г. отмеченные особенности в изменении рассматриваемых параметров менее выражены, возможно, вследствие влияния суббуревой активности, наблюдаемой до начала магнитной бури и являющейся результатом усиления продольных токов, обусловленных электрическим полем магнитосферной конвекции, которое возникает при взаимодействии солнечного ветра и ММП с магнитосферой.

Изменения аномалий верхней облачности имеют однонаправленную тенденцию с динамикой аномалий ЭП в высоких широтах во время мощных геомагнитных бурь (рис. 4). Особенности, характерные для динамики контраста рассматриваемых параметров, сохраняются в поведении их аномалий. Однако амплитуда отклика положительных аномалий верхней облачности на изменение положительного ЭП на порядок величины выше, чем амплитуда отклика отрицательных аномалий верхней облачности на изменение отрицательного ЭП. Рассмотрим карты аномалий ЭП и пространственное распределение аномалий верхней облачности (рис. 5) во время магнитной бури 23 апреля 2023 г. В спокойных условиях

на широтах выше 60° N аномалии верхней облачности однородно распределены и составляют единицы процентов. Наибольшее увеличение верхней облачности наблюдается в области усиления положительного потенциала, который оказывает нелинейное воздействие на свойства водяного пара, в данном случае поступающего из средних широт с циклонами, которые возникают у восточного побережья Евразии и, перемещаясь к северо-востоку, достигают максимального развития в районе Алеутских островов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наша планета, являясь открытой системой, подвержена влиянию изменений в солнечном ветре вследствие активных процессов на Солнце. Быстрые изменения климата на Земле являются причиной продолжения дискуссии о величине и характере солнечного влияния на нижнюю атмосферу. Пространственная неоднородность тропосферного отклика на солнечное воздействие в большей степени может проявляться в изменчивости регионального климата в результате изменения оптических свойств водяного пара в тропосфере во время геомагнитных возмущений [Karakhanyan, Molodykh, 2025]. Детальное изучение изменений местного климата (высокие широты, внутриконтинентальные регионы) под действием процессов на Солнце возможно на основе данных, полученных на инструментальной базе ИСЗФ СО РАН, в частности, с использованием УНУ «Оптические инструменты» [<https://iszf.irk.ru/usu-optical-instruments/>].

В проведенном исследовании мы использовали контраст в вариациях ЭП, который является проху солнечной активности, что позволило минимизировать

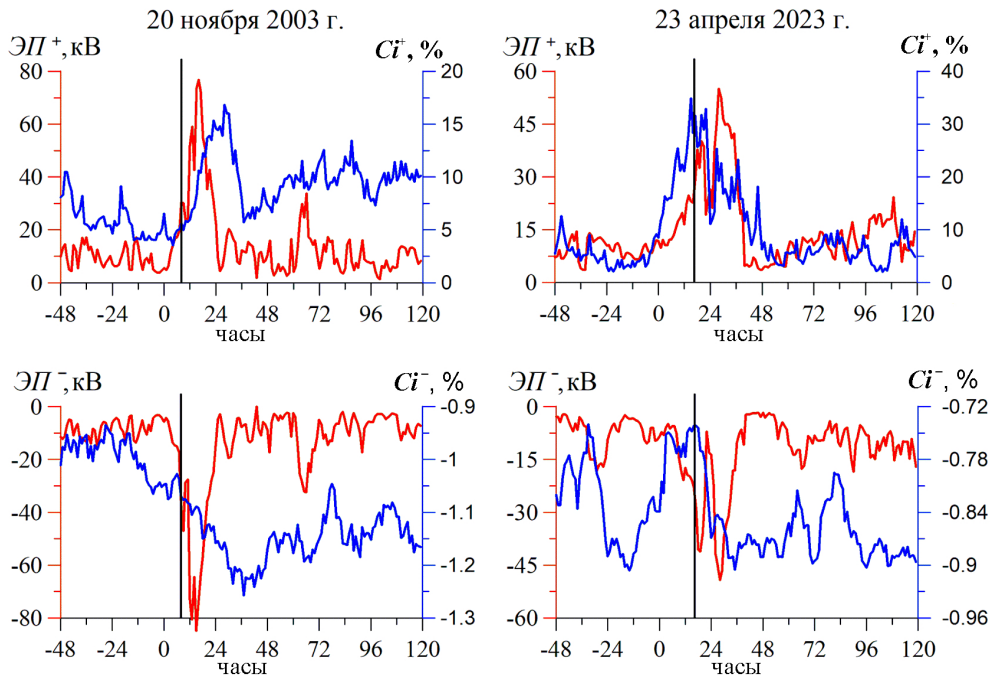


Рис. 4. Изменения положительных (сверху) и отрицательных (снизу) аномалий ЭП (красные кривые) и аномалий верхней облачности (синие кривые), усредненные для области широт выше 60° N, во время мощных магнитных бурь. Вертикальная линия — начало геомагнитной бури; ноль по оси абсцисс — 00 UT дня начала геомагнитной бури

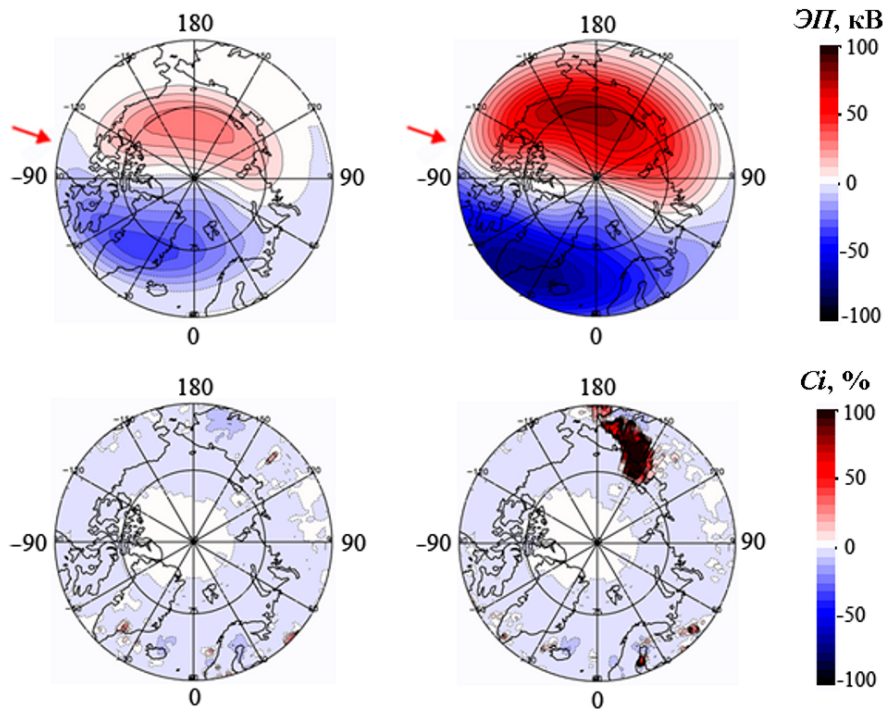


Рис. 5. Пространственные распределения аномалий ЭП (сверху) и верхней облачности (снизу) в спокойный период (слева) и в период их максимума (справа) в среднем за 3 ч с 18 UT по 20 UT для области широт выше 60° N во время очень большой геомагнитной бури 23 апреля 2023 г. Полуденный меридиан показан стрелками

различия между его расчетами по разным версиям модели Веймера (см. рис. 2). Показана высокая корреляция между изменениями контраста ЭП, усредненного для высокоширотной области, и вариациями геомагнитного индекса PC (см. рис. 3). Основываясь на данном результате, можно рекомендовать обе характеристики в качестве индикатора солнечной активности при изучении мощных магнитных бурь.

Спектр метеопараметров состоит из высокочастотной (суточная, сезонная, годовая и 2–5-летние вариации) и низкочастотной составляющих. Последняя содержит вариации, близкие к гелиогеофизическим периодам, в частности, обнаружена ~22-летняя вариация, подобная магнитному циклу Хейла на Солнце, в изменчивости траекторий внетропических циклонов в Северной Атлантике [Veretenenko et al., 2023b].

Поскольку солнечный сигнал, присутствующий в метеопараметрах, меньше амплитуды их суточной и сезонной вариаций, мы изучаем изменения не самой величины, а изменение аномалий или отклонений метеопараметров от их среднего значения во время возмущения. На примере очень сильных геомагнитных бурь 23-го и 25-го солнечных циклов, которые являются циклами средней величины и вторыми компонентами 22-летнего цикла магнитной активности [Ishkov, 2010, 2024], показано, что во время отдельных мощных возмущений увеличение контраста ЭП сопровождается ростом контраста метеопараметров, особенно контраста верхней облачности (см. рис. 3). Применительно к метеопараметрам контраст использовался в качестве интегральной характеристики для иллюстрации амплитуды изменений метеорологического отклика на солнечное влияние из-за неоднородной структуры тропосферного отклика в пространстве. Результаты исследования получены в рамках модели механизма опосредованного влияния солнечных процессов на радиационный баланс климатической системы, разрабатываемой в ИСЗФ СО РАН. Они помогут создать параметризацию физических процессов в тропосфере в соответствии с предлагаемым сценарием и, следовательно, включить солнечную активность, наряду с солнечной постоянной, в климатические модели.

ВЫВОДЫ

Анализ связи вариаций ЭП с изменениями метеопараметров во время мощных магнитных бурь позволил получить следующие результаты.

Пространственные распределения ЭП, полученные с помощью версий 2001 и 2005 гг. модели Веймера, наиболее сильно различаются во время максимума возмущения.

Вариации аномалий ЭП, усредненные для области широт выше 60° N, существенно различаются в рассмотренных версиях модели Веймера. Однако вариации усредненного контраста ЭП, рассчитанные по версиям 2001 и 2005 гг., во время мощных возмущений происходят синхронно.

Корреляционный анализ изменений усредненного контраста ЭП с вариациями геомагнитного индекса *PC* показал, что обе характеристики можно использовать в качестве прокси солнечной активности для изучения изолированных мощных возмущений.

Во время возмущений увеличение контраста ЭП сопровождается ростом контраста метеопараметров, особенно контраста верхней облачности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абунина М.А., Шлык Н.С., Белов С.М. и др. О наиболее интересных событиях в солнечном ветре и космических лучах в 2023–2024 гг. *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XVIII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»*. Иркутск. 2024, с. 5–7. DOI: [10.62955/0135-3748-2024-5](https://doi.org/10.62955/0135-3748-2024-5).
Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Миронова И.А. Изменения химического состава в полярных областях

Земли после протонных вспышек на Солнце (трехмерное моделирование). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2017, т. 57, № 2, с. 173–194. DOI: [10.7868/S0016794017020079](https://doi.org/10.7868/S0016794017020079).
Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А. Оценка влияния солнечной активности на уходящий поток инфракрасного излучения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020, т. 60, № 2, с. 208–215. DOI: [10.31857/S0016794020020108](https://doi.org/10.31857/S0016794020020108).
Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2019–2022 гг. *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2023, т. 59, № 7, с. 830–851. DOI: [10.31857/S0002351523070106](https://doi.org/10.31857/S0002351523070106).
Пташник И.В. Континуальное поглощение водяного пара: краткая предыстория и современное состояние проблемы. *Оптика атмосферы и океана*. 2015, т. 28, № 5, с. 443–459. DOI: [10.15372/AOO20150508](https://doi.org/10.15372/AOO20150508).
Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M., et al. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. IV. Unusual magnetic cloud and overall scenario. *Solar Phys.* 2014, vol. 289, iss. 12, pp. 4653–4673. DOI: [10.1007/s11207-014-0596-5](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0596-5).
Harrison R.G., Lockwood M. Rapid indirect solar responses observed in the lower atmosphere. *Proc. Roy. Soc. A*. 2020, vol. 476, iss. 2241, 20200164. DOI: [10.1098/rspa.2020.0164](https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0164).
Ishkov V.N. Properties and surprises of solar activity XXIII cycle. *Sun and Geosphere*. 2010, vol. 5, iss. 2, pp. 43–46.
Ishkov V.N. Current solar cycle 25 on the eve of the maximum phase. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024, vol. 64, iss. 7, pp. 1167–1175. DOI: [10.1134/S0016793224700257](https://doi.org/10.1134/S0016793224700257).
Karakhanyan A.A., Molodykh S.I. A decline of linear relation between outgoing longwave radiation and temperature during geomagnetic disturbances. *JASTP*. 2025, vol. 270, iss. 5, 106503. DOI: [10.1016/j.jastp.2025.106503](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106503).
Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F., et al. Energetic particle influence on the Earth's atmosphere. *Space Sci. Rev.* 2015, vol. 194, iss. 1–4, pp. 1–96. DOI: [10.1007/s11214-015-0185-4](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4).
Simonova A.A., Ptashnik I.V., Elsey J., et al. Water vapour self-continuum in near-visible IR absorption bands: Measurements and semiempirical model of water dimer absorption. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022, vol. 277, iss. 1, 107957. DOI: [10.1016/j.jqsrt.2021.107957](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107957).
Tinsley B.A. The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics. *Reports on Progress in Physics*. 2008, vol. 71, iss. 6, 066801. DOI: [10.1088/0034-4885/71/6/066801](https://doi.org/10.1088/0034-4885/71/6/066801).
Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrom S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index. *Planet. Space Sci.* 1988, vol. 36, iss. 11, pp. 1095–1102. DOI: [10.1016/0032-0633\(88\)90063-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90063-3).
Veretenenko S.V., Dmitriev P.B., Dergachev V.A. Long-term effects of solar activity on cyclone tracks in the North Atlantic. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2023a, vol. 16, iss. 1.2, pp. 454–460. DOI: [10.18721/JPM.161.269](https://doi.org/10.18721/JPM.161.269).
Veretenenko S.V., Dmitriev P.B., Dergachev V.A. Long-term changes main trajectories of extratropical cyclones in the North Atlantic and their possible association with solar activity. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023b, vol. 63, iss. 7, pp. 953–965. DOI: [10.1134/s0016793223070265](https://doi.org/10.1134/s0016793223070265).
Weimer D.R. An improved model of ionospheric electric potentials including substorm perturbations and application to the Geospace Environment Modeling November 24, 1996, event. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2001, vol. 106, iss. A1, pp. 407–416. DOI: [10.1029/2000JA000604](https://doi.org/10.1029/2000JA000604).
Weimer D.R. Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, iss. A5, A05306. DOI: [10.1029/2004JA010884](https://doi.org/10.1029/2004JA010884).

Wielicki B.A., Barkstrom B.R., Harrison E.F., et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An Earth Observing System Experiment. *Bull. American Meteorological Society*. 1996, vol. 77, iss. 5, pp. 853–868. DOI: [10.1175/1520-0477\(1996\)077<0853:CATERE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0853:CATERE>2.0.CO;2).

URL: <https://zenodo.org/records/2530324> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://iszf.irk.ru/usu-optical-instruments/> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SYN1degEd41Selection.jsp> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://pcindex.org/> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Караханян А.А., Молодых С.И. Метеорологический отклик на изменение электрического потенциала ионосферы, обусловленного возмущенным солнечным ветром. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 100–107. DOI: [10.12737/szf-113202511](https://doi.org/10.12737/szf-113202511).