

ОТКЛИК ТРОПОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВО ВРЕМЯ МОЩНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В 23-М ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

TROPOSPHERIC RESPONSE TO SOLAR EFFECTS DURING GEOMAGNETIC SUPERSTORMS IN SOLAR CYCLE 23

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 гелиогеофизического параметра при анализе тропосферного отклика на солнечное воздействие во время мощных геомагнитных бурь в 23-м цикле солнечной активности. На основе наблюдательных данных показано, что отклик метеопараметров происходит одновременно с вариациями $ЭП$ во время очень большой магнитной бури 20 ноября 2003 г., вызванной экстремально геоэффективным событием. Тропосферный отклик сдвигается по времени относительно максимума $ЭП$ во время очень большой магнитной бури 15 июля 2000 г.: увеличение высоты слоя осаждаемой воды наблюдается через 6 ч; уменьшение уходящей длинноволновой радиации — через 12 ч; увеличение верхней облачности — через 18 ч. Обнаружено, что амплитуда отклика метеопараметров на вариации $ЭП$ примерно вдвое меньше во время магнитной бури 15 июля 2000 г. по сравнению с тропосферным откликом во время геомагнитной бури 20 ноября 2003 г.

Ключевые слова: электрический потенциал ионосферы, солнечная активность, геомагнитный индекс, уходящая длинноволновая радиация, облачность, водяной пар, климат.

Abstract. The ionospheric electric potential (EP) is used as a heliogeophysical parameter to analyze tropospheric response to solar impacts during geomagnetic superstorms in solar cycle 23. According to observational data, the response of meteorological parameters is shown to concur with EP variations during the November 20, 2003 geomagnetic superstorm caused by an extreme geoeffective event. The tropospheric response is time-shifted versus EP maximum during the July 15, 2000 magnetic superstorm: increased precipitable water is observed in 6 hrs; decreased outgoing longwave radiation, in 12 hrs; increased upper cloudiness, in 18 hrs. We have found that the amplitude of the meteorological parameters' response to EP variations during the July 15, 2000 magnetic superstorm is about half as low as that of the tropospheric response during the November 20, 2003 geomagnetic superstorm.

Keywords: ionospheric electric potential, solar activity, geomagnetic index, outgoing longwave radiation, cloudiness, water vapor, climate.

ВВЕДЕНИЕ

Электрический потенциал ($ЭП$) ионосферы может быть использован в качестве одного из гелиогеофизических параметров при анализе процессов в системе магнитосфера—ионосфера—тропосфера. Наиболее известные электрические механизмы влияния солнечной активности на тропосферу направлены на определение изменений в поступающей солнечной радиации. Электрическое поле в ионосфере через изменения в глобальной электрической цепи оказывает влияние на микрофизику облаков, следовательно, меняется приходящая коротковолновая радиация [Tinsley, 2000; Kniveton et al., 2008; Harrison, Lockwood, 2020]. Согласно электрическому механизму, разрабатываемому в ИСЗФ СО РАН, вариации солнечной активности через изменения параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного

магнитного поля (ММП) влияют на магнитосферную конвекцию, которая, в свою очередь, влияет на распределение разности $ЭП$ между ионосферой и землей. Увеличение $ЭП$ приводит к перестройке вертикального профиля объемного электрического заряда, который влияет на фазовое состояние водяного пара (усиливается образование облаков в атмосфере), и изменению кластерного состава в безоблачных областях (увеличивается количество димеров и более крупных кластеров). Следовательно, оптические свойства водяного пара изменяются в инфракрасной области спектра, тем самым усиливая парниковый эффект атмосферы. В результате произойдут изменения радиационного баланса, в частности, уходящего длинноволнового потока ($\lambda > 4$ мкм) [Молодых и др., 2020]. Все характеристики солнечной/геомагнитной активности разработаны для описания динамических про-

цессов на Солнце и в околоземном космическом пространстве. Изучение климатических изменений, связанных с солнечным воздействием, предполагает наличие характеристики, отражающей солнечное влияние, достигшее Земли, и имеющей длинный ряд. Наиболее часто в задаче солнечно-тропосферных связей используют относительное число солнечных пятен (число Вольфа) [Ишков, 2018]. Длительный ряд чисел Вольфа применяют для исследования цикличности в долговременных вариациях метеопараметров. Геомагнитные индексы лучше соответствуют заданному условию, но они описывают, в первую очередь, геомагнитные вариации длительностью меньше трех часов, а их глобальность не позволяет построить распределение в пространстве [Гаврилов и др., 2016; Yamazaki et al., 2022]. Ранее мы изучили возможность использования ЭП в качестве показателя солнечного воздействия на тропосферу. В работе [Караханян, Молодых, 2023] на основе спутниковых данных о магнитном поле СВ и параметрах плазмы в околоземном пространстве проанализирована пространственно-временная динамика вариаций ЭП в современном потеплении. Тенденция повышения ЭП наблюдается три последних солнечных цикла. Противоположная тенденция характерна для геомагнитных индексов. Обнаруженная синхронность долговременных вариаций ЭП и приповерхностной температуры, возможно, определяется крупномасштабным магнитным полем Солнца в большей степени, чем мелкомасштабным, и оказывает влияние на изменения параметров климатической системы. Цикл 23 представляет собой переходный период между эпохами повышенной и пониженной солнечной активности (СА). Он является циклом средней величины и вторым компонентом физического 22-летнего цикла смены полярности полюсов магнитного поля в фазе максимума 11-летнего цикла. Наиболее мощные вспышечные события происходили не только в максимуме, но и на фазе спада цикла. Отметим некоторые особенности его развития: характерные признаки стабильных (не вспышечных) активных областей, затянувшаяся высокая вспышечная активность на фазе спада цикла, рост числа спокойных геомагнитных дней вследствие снижения вспышечной активности. Данные особенности свидетельствуют о смене режима генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца. В этом случае Солнце вступает в период средних и малых циклов, который может продлиться от 50 до 100 лет [Ишков, 2005; Ишков, 2018]. Целью работы является анализ отклика метеопараметров (уходящей длинноволновой радиации, осаждаемой воды, верхней облачности) на вариации ЭП во время отдельных мощных геомагнитных бурь в 23-м цикле.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Наиболее геоэффективные вспышки года максимума 23-го цикла связаны с прохождением большой группы пятен AR9077 во второй декаде июля 2000 г. Очень большая магнитная буря 15 июля 2000 г. является следствием мощной солнечной вспышки,

получившая собственное имя Бастилия (см. табл. 1). Интенсивная вспышечная активность в цикле наблюдалась в октябре–ноябре 2003 г. Сложное событие 18 ноября привело к экстремальному геоэффективному воздействию на околоземное пространство. Геомагнитная буря, зарегистрированная 20 ноября 2003 г., является самой мощной в цикле с $Dst = -422$ нТл [Ishkov, 2005; Grechnev et al., 2014; <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>].

Расчеты пространственного распределения ЭП выполнены с использованием кода модели Веймера 2000 г. на языке программирования IDL. В данном варианте полумпирической модели Веймера горизонтальная структура электрического поля определяется вариациями параметров СВ, ММП и AL -индексом геомагнитной активности. Последний параметр включен для учета влияния ночных магнитосферных суббурь на структуру ЭП [Weimer, 2001]. Анализируются события на временном масштабе от часов до нескольких суток в предположении, что регулярные вариации электрического потенциала и других параметров изменяются незначительно. Тропосферный отклик изучается для области широт выше 60° N, поэтому мы выбрали геомагнитный индекс AE , описывающий возмущенность магнитного поля Земли на высоких широтах. Данные о межпланетной среде и геомагнитные индексы (AE , AL) с часовым разрешением получены из базы данных OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html]. Мы использовали часовые значения метеопараметров из набора данных CERES-SYN1deg в сетке $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ [Wielicki et al., 1996, CERES_SYN1degEd4.1Subsetting and Browsing]. Уходящая длинноволновая радиация (УДР) представлена наблюдаемым CERES широкополосным излучаемым тепловым уходящим потоком в верхней части атмосферы (высота $h \sim 20$ км). Количество облаков (Cloud Area Fraction) — доля неба, покрытая облаками верхнего яруса (от 300 гПа до тропопаузы) и выраженная в процентах. Осажденная вода — общая масса водяного пара в вертикальном столбе атмосферы (от поверхности до h), выраженная высотой слоя W эквивалентной массы накопленной осаждаемой воды, если бы она была сконденсирована. В тропосфере существует естественный синоптический период (ЕСП) — промежуток времени, в течение которого сохраняется перемещение циклонов/антициклонов и расположение их центров в определенном районе Земли или на всем полушарии (ЕСП ~ 7 сут). Для минимизации влияния синоптических процессов мы рассчитали аномалии анализируемых параметров относительно среднего суточного хода за 7 сут до начала события и проанализировали динамику аномалий рассматриваемых характеристик во время выбранных магнитных бурь, усредненных для области широт выше 60° N. Расчет карт аномалий ЭП выполнен согласно формуле

$$\Delta \text{ЭП}_{ij} = \text{ЭП}_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{k=-7}^{k=1} \text{ЭП}_{kj},$$

где i — номер дня возмущения; j — номер часа в сутках; k — номер дня для расчета среднего суточного хода; $n=7$. Аналогично рассчитаны карты аномалий метеопараметров.

Таблица 1

Гелиогеофизическая обстановка во время мощных магнитных бурь 23-го ЦЦ

Дата события	Характеристика вспышки на Солнце				Дата и значение Dst , нТл
	дата	класс	активная область	гелиокоординаты	
15–16.07.2000	14.07.2000	X5.7/3B	9077	22° N 07° W	16.07.2000, $Dst = -301$ нТл
20–21.11.2003	18.11.2003	M3.2	10501	00° N 18° E	20.11.2003, $Dst = -422$ нТл

Таблица 2

Входные параметры ММП и солнечного ветра для расчета аномалий ЭП по модели Веймера

Час	B_y , нТл	B_z , нТл	V , км/с	n , см ⁻³	$ B $	угол, град.	AL , нТл
Спокойные условия 18 ноября 2003 г.							
17 UT	-0.6	-1.8	683	2.4	1.9	198.4	-372
Возмущенные условия 20 ноября 2003 г.							
16 UT	12.9	-50.1	584	16.1	51.73	165.6	-1790
17 UT	-2.2	-44.4	596	18.7	44.45	182.8	-1619
18 UT	-12.0	-37.5	580	18.7	39.37	197.7	-1030
Спокойные условия 13 июля 2000 г.							
20 UT	4.0	-0.6	607	4.6	4.0	98.5	-110
Возмущенные условия 15 июля 2000 г.							
19 UT	13.2	-35.3	1000	20.6	37.7	159.5	-797
20 UT	17.6	-45.3	1040	5.9	48.6	158.8	-1088
21 UT	38.7	-19.9	1107	7.2	43.5	117.2	-620

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Сверхсильные магнитные бури 23-го цикла характеризовались экстремальными значениями параметров на Солнце, в магнитосфере и в ионосфере Земли [Ермолаев и др., 2005; Благоевская и др., 2005; Клейменова, Козырева, 2009; Ким и др., 2011]. Динамика вариаций ЭП, АЕ и метеопараметров, усредненных для области широт выше 60° N, показана на рис. 1. Внезапное начало магнитной бури 20 ноября 2003 г. зарегистрировано в 08 UT, ее главная фаза по Dst началась в 12 UT. Анализ показал, что вариации ЭП антикоррелируют с АЕ в начальной фазе бури ($r = -0.80 \pm 0.35$). Корреляция между рассматриваемыми параметрами наблюдается с 18 UT главной фазы бури до 09 UT 21 ноября фазы восстановления ($r = 0.83 \pm 0.15$). Тропосферный отклик происходит одновременно с вариациями ЭП с 08 UT по 18 UT 21 ноября: W увеличивается ($r = 0.75 \pm 0.12$), $УДР$ уменьшается ($r = -0.53 \pm 0.15$), облачность верхнего яруса увеличивается ($r = 0.19 \pm 0.17$). Максимум W достигается через 1 ч относительно максимума ЭП. Максимум отклика $УДР$ на вариации ЭП наблюдается через 3 ч после достижения ЭП максимального значения. Максимальная облачность верхнего яруса отмечается позже по сравнению с откликом осаждаемой воды и $УДР$ на вариации ЭП. Верхняя облачность достигает максимального значения через 6 ч относительно максимума ЭП. Повторное уменьшение $УДР$ отмечается после максимального увеличения облачности, т. е. может быть следствием возрастания облачности верхнего яруса (см. рис. 1, верхняя левая панель).

Особенности в поведении вариаций ЭП и АЕ в целом сохраняются во время очень большой магнитной бури 15 июля 2000 г., которая началась в 14:37 UT. Вариации ЭП антикоррелируют с АЕ в начальной фазе бури в 15–18 UT ($r = -0.56 \pm 0.59$). Анализируе-

мые параметры коррелируют с 20 UT главной фазы до завершения ранней стадии восстановительной фазы (09 UT 16 июля, $r = 0.93 \pm 0.11$). Максимум отклика метеопараметров на вариации ЭП сдвигается по времени относительно его максимума: увеличение W наблюдается через 6 ч, уменьшение $УДР$ — через 12 ч, возрастание облаков верхнего яруса — через 18 ч. Следует отметить, что амплитуда тропосферного отклика на вариации ЭП примерно в два раза меньше во время магнитной бури 15 июля 2000 г. по сравнению с откликом метеопараметров в течение геомагнитной бури 20 ноября 2003 г. (см. рис. 1, верхняя правая панель).

Пространственное распределение изопотенциалов, представленное на рис. 2, 3, рассчитывалось для условий межпланетной среды согласно табл. 2: B_y и B_z — компоненты ММП; V — скорость СВ; n — плотность протонов; угол ММП — $-180^\circ \div 180^\circ$, 0 — север; AL — индекс геомагнитной активности.

На рис. 2 показана структура анализируемых параметров в пространстве для спокойного периода и пространственная структура их максимального отклика на событие 20 ноября 2003 г. Обнаружено, что увеличение ЭП во время возмущения сопровождается увеличением W , уменьшением $УДР$ и менее выраженным увеличением верхней облачности. Аналогичный тропосферный отклик на вариации ЭП наблюдается во время геомагнитной бури 15 июля 2000 г. Однако его пространственная структура выражена менее четко из-за изменений метеопараметров в годовом ходе с соответствующими сезонными изменениями атмосферной циркуляции, которая летом характеризуется неустойчивостью тропосферы вследствие развития активной циклонической деятельности на полушарии (рис. 3). Обнаруженные особенности в поведении тропосферного отклика на вариации ЭП согласуются с теоретическим механизмом влияния

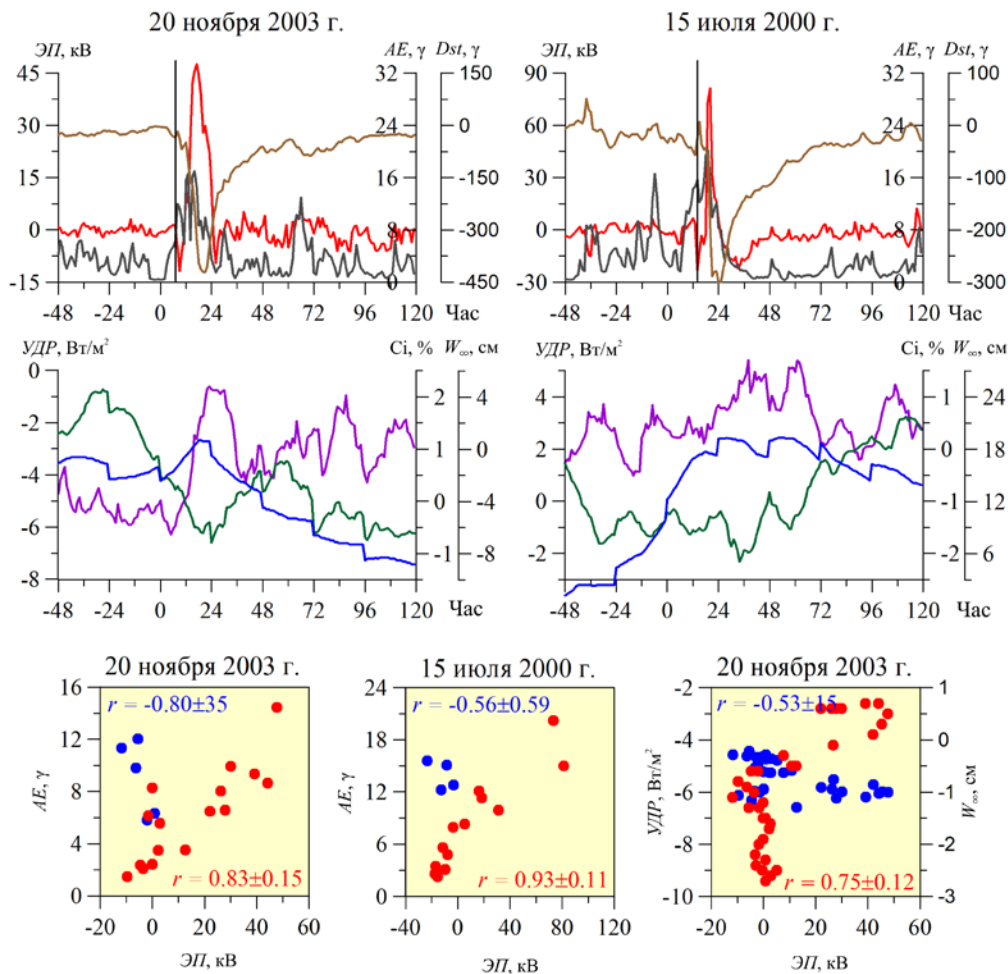


Рис. 1. Изменения аномалий ЭП (красная линия), метеопараметров и геомагнитных индексов (верхние и средние панели): черная — $AE \times 10^2$ и коричневая — Dst ; зеленая — $УДР$; фиолетовая — облака верхнего яруса (Ci); синяя — осадочная вода ($W_{ос} \times 10^{-2}$). Метеопараметры усреднены для области широт выше $60^\circ N$ за 7-дневный интервал во время очень больших геомагнитных бурь. Вертикальная линия — начало геомагнитной бури. Ноль по горизонтальной оси — 00 UT дня начала геомагнитной бури. Диаграммы рассеяния часовых значений ЭП и AE, ЭП и метеопараметров (нижние панели)

солнечной активности на климатическую систему, разрабатываемым в ИСЗФ СО РАН. Механизм предполагает, что определяющим фактором при оценке величины тропосферного отклика во время возмущений является изменение оптических свойств водяного пара в тропосфере.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение проблемы влияния солнечных процессов на климатическую систему позволило нам определить ЭП в качестве оптимальной прокси солнечной активности. Обнаруженная антикорреляция вариаций ЭП и AE во время событий подтверждает предположение, что вариации ЭП отражают и спорадические процессы, и медленные изменения общего магнитного поля Солнца, в отличие от индексов, которые характеризуют степень возмущенности геомагнитного поля. На основе спутниковых данных мы обнаружили, что возрастание ЭП сопровождается увеличением W , уменьшением $УДР$ и ростом верхней облачности в высокоширотной тропосфере во время очень больших геомагнитных бурь 23-го цикла. Известно, что пространственная структура тро-

посферного отклика на солнечное воздействие зависит как от мощности событий, так и от состояния тропосферы. Согласно результатам работы [Grechnev et al., 2014], анализируемые события похожи по расположению источников вблизи центра солнечного диска и интенсивности геомагнитного эффекта, который определялся параметрами солнечных источников, таких как очень сильное ММП > 50 нТл и большая южная B_z -компонента. Экстремальный геомагнитный эффект 20 ноября 2003 г. отчетливо проявился в зимней атмосфере.

Минимальная задержка отклика метеопараметров на повышение ЭП составила часы и наблюдалась во время очень большой геомагнитной бури 20 ноября 2003 г. Полученные результаты хорошо описываются физическим механизмом, разрабатываемым в ИСЗФ СО РАН, в котором солнечная активность влияет на способность водяного пара (основного парникового газа) поглощать в инфракрасном диапазоне [Молодых и др., 2020]. Поиск солнечного сигнала в климатических изменениях посредством изучения динамики уходящей радиации во время событий является отличием нашей гипотезы по срав-

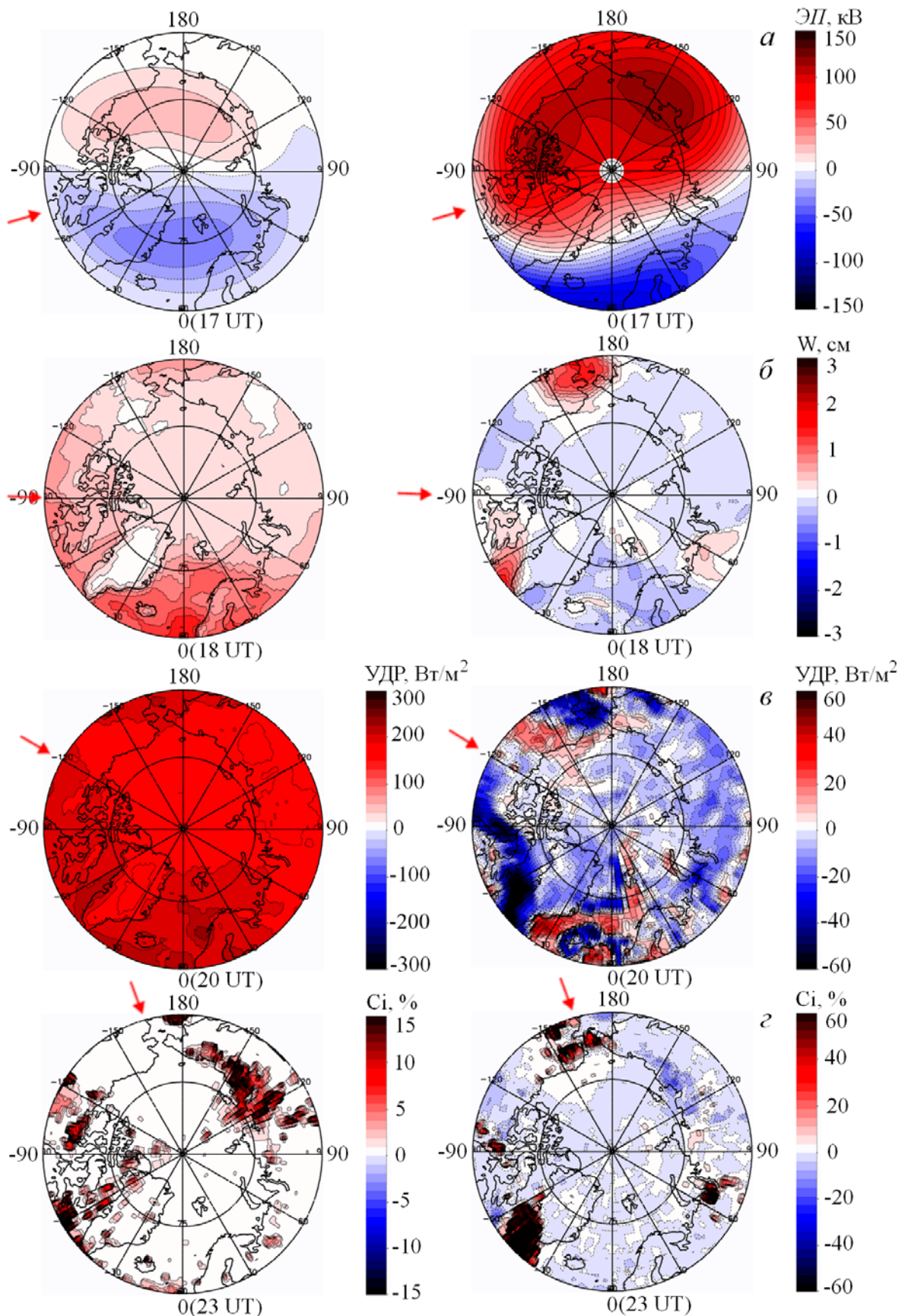


Рис. 2. Пространственное распределение аномалий ЭП (а), осажденной воды (б), УДР (в), верхней облачности (г) в спокойный период (слева) и в период их максимума (справа) во время очень большой геомагнитной бури 20 ноября 2003 г. для области широт выше 60° N. Полуденный меридиан показан стрелками, в скобках — время максимума события

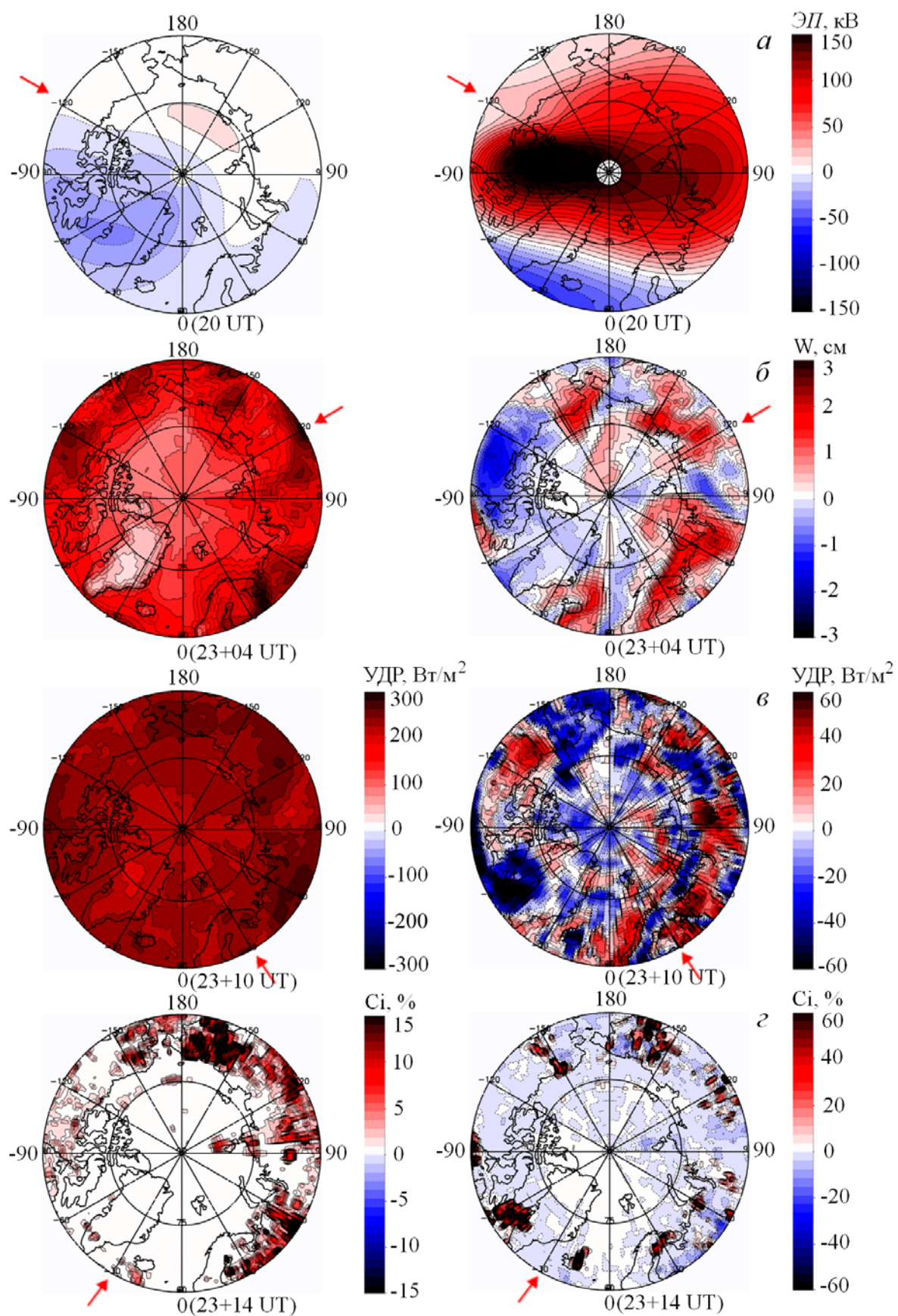


Рис. 3. То же, что на рис.2, для бури 15 июля 2000 г.

нению с другими механизмами влияния солнечной активности на климат, ориентированными на изучение изменений приходящей радиации. Следует отметить, что использование ЭП в качестве гелиогеофизического параметра позволило нам уменьшить недостатки, характерные для геомагнитных индексов, но ограничение, связанное с нелинейностью солнечно-тропосферной связи, сохраняется на временном масштабе < 3 ч. Согласно нашему механизму, солнечная активность может быть одним из факторов, влияющих на формирование облачно-радиационного вынужденного воздействия на климат (ОРВВ). По результатам, полученным на основе данных аппаратуры ERBE, среднеглобальное ОРВВ = -15 Вт/м² [Кондратьев, Крапивин, 2006]. Модельные расчеты показали, что отрицательный коротковолновый эффект (выхлаживание) является большим, чем положительный длинноволновый эффект (нагревание) воздействия облачности на систему подстилающая поверхность — атмосфера [Кондратьев, 1992]. В дальнейших исследованиях планируется включение ЭП как проху солнечной активности в параметризацию облакообразования для модельного блока переноса излучения в атмосфере. Сопоставление результатов численного моделирования и наблюдений позволит оценить вклад солнечной активности в изменения составляющих радиационного баланса Земли.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ тропосферного отклика на вариации ЭП во время мощных геомагнитных бурь в 23-м цикле СА позволил сформулировать следующие результаты.

1. Положительная связь между вариациями ЭП и АЕ нарушается во время главной фазы мощных геомагнитных бурь. Обнаруженная особенность позволяет предполагать, что вариации ЭП отражают и спорадические процессы, и медленные изменения крупномасштабного магнитного поля Солнца, в отличие от геомагнитных индексов, которые характеризуют степень возмущенности магнитного поля Земли.

2. Отклик метеопараметров происходит одновременно с вариациями ЭП во время очень большой магнитной бури 20 ноября 2003 г., вызванной экстремально геоэффективным событием.

3. Тропосферный отклик сдвигается по времени относительно максимума ЭП во время очень большой магнитной бури 15 июля 2000 г.: увеличение W наблюдается через 6 ч, уменьшение УДР — через 12 ч, возрастание облаков верхнего яруса — через 18 ч.

4. Амплитуда отклика метеопараметров на вариации ЭП примерно вдвое меньше во время магнитной бури 15 июля 2000 г. по сравнению с тропосферным откликом в течение геомагнитной бури 20 ноября 2003 г.

Авторы благодарят проф. Д.Р. Веймера за предоставленный код модели для расчета ЭП. Авторы выражают признательность рецензенту за внимательное чтение рукописи и ценные замечания, способствующие ее улучшению.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенская Н.Ф., Благовещенский Д.В., Корниенко В.А. и др. Ионосферные эффекты в главную фазу магнитной бури 20 ноября 2003 г. в Европейском регионе Арктике. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. Т. 45, № 1. С. 64–74.
- Гаврилов Б.Г., Ряховский И.А., Маркович И.Э. и др. О применимости планетарных и станционных индексов геомагнитной активности. *Гелиогеофизические исследования*. 2016. № 15. С. 42–48.
- Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Солнечные и гелиосферные возмущения, приведшие к сильной магнитной бури 20 ноября 2003 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005. Т. 45, № 1. С. 23–50.
- Ишков В.Н. Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. Т. 58, № 6. С. 785–800. DOI: [10.1134/S0016794018060056](https://doi.org/10.1134/S0016794018060056).
- Караханян А.А., Молодых С.И. Электрический потенциал ионосферы — альтернативный индикатор солнечного воздействия на нижнюю атмосферу. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 111–115. DOI: [10.12737/szf-92202313](https://doi.org/10.12737/szf-92202313) // Karakhanyan A.A., Molodykh S.I. Ionospheric electric potential as an alternative indicator of solar effect on the lower atmosphere. *Solar-Terrestrial Physics*. 2023. Vol. 9, iss. 2. P. 103–106. DOI: [10.12737/stp-92202313](https://doi.org/10.12737/stp-92202313).
- Ким В.П., Мин К.В., Хегай В.В. и др. Региональные особенности морфологии возмущений электронной концентрации в максимуме F2 слоя на средних широтах во время магнитной супербури 15 июля 2000 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. Т. 51, № 2. С. 257–269.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Восстановительная фаза сверхсильной магнитной бури 15–17 июля 2000 г.: суббури и ULF пульсации. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2009. Т. 49, № 3. С. 321–334.
- Кондратьев К.Я. Глобальный климат. СПб.: Наука, С.-Петербургское отд-ние. 1992. 359 с.
- Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Радиационный баланс Земли как индикатор глобального экологического равновесия. *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 1. С. 3–9.
- 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).
- Harrison R.G., Lockwood M. Rapid indirect solar responses observed in the lower atmosphere. *Proceedings of the Royal Society A*. 2020. Vol. 476, iss. 2241. P. 20200164. DOI: [10.1098/rspa.2020.0164](https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0164).
- 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. P. 4653–4673. DOI: [10.1007/s11207-014-0596-5](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0596-5).
- Ishkov V.N. Properties of the current 23rd solar-activity cycle. *Solar System Res*. 2005. Vol. 39, iss. 6. P. 453–461.
- Kniveton D.R., Tinsley B.A., Burns G.B., et al. Variations in global cloud cover and the fair-weather vertical electric field. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2008. Vol. 70, iss. 13. P. 1633–1642. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.07.001).
- Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Sci. Rev*. 2000. Vol. 94, iss. 1–2. P. 231–258.
- 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. P. 407–416.

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. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. Vol. 77, iss. 5. P. 853–868.

Yamazaki Y., Matzka J., Stolle C., et al. Geomagnetic activity index Нро. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, iss. 10. e2022GL098860. DOI: [10.1029/2022GL098860](https://doi.org/10.1029/2022GL098860).

URL: [CERES_SYN1degEd4.1SubsettingandBrowsing](https://ceres.syn1degEd4.1SubsettingandBrowsing) (дата обращения 5 июля 2024 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (дата обращения 5 июля 2024 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 5 июля 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Караханян А.А., Молодых С.И. Отклик тропосферы на солнечное воздействие во время мощных геомагнитных бурь в 23-м цикле солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, № 1. С. 55–62. DOI: [10.12737/szf-111202506](https://doi.org/10.12737/szf-111202506).