
МНОГОФАКТОРНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МОЩНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ В 25-М СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

MULTIVARIATE REGRESSION ANALYSIS OF ATMOSPHERIC TRANSPARENCY INDICATORS DURING POWERFUL MAGNETIC STORMS IN SOLAR CYCLE 25

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*

С.В. Подлесный

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, stepan@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*

S.V. Podlesny

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

Аннотация. Метод множественной линейной регрессии использовался для оценки степени влияния солнечных факторов на изменение показателей прозрачности атмосферы во время мощных магнитных бурь в марте и апреле 2023 г. Регрессионные модели строились по уравнению двухфакторной линейной регрессии, в которой влияющими факторами выбраны: контраст электрического потенциала (ЭП) ионосферы и космические лучи (КЛ). Показано, что коэффициент детерминации увеличивается в построенных регрессионных моделях, т. е. выбранные факторы увеличивают долю объясненной дисперсии характеристик прозрачности атмосферы. Оценена степень влияния каждого объясняющего фактора, включенного в регрессионные модели. Получено, что КЛ являются фактором, который объясняет наибольшую долю дисперсии параметров облачности в слое максимального содержания водяного пара (700–500 гПа). Обнаружено, что относительный вклад КЛ в прирост объясненной дисперсии параметров облачности равнозначен вкладу контраста ЭП, который объясняет наибольшую долю дисперсии контраста уходящей длинноволновой радиации. Полученные результаты иллюстрируют роль КЛ в электрическом механизме нелинейного воздействия солнечной активности на климатическую систему, теоретические основы которого разрабатываются в ИСЗФ СО РАН.

Ключевые слова: солнечная активность, космические лучи, электрический потенциал ионосферы, облачность, прозрачность атмосферы, камера всего неба, климат.

Abstract. A multiple linear regression method was employed to assess the degree of influence of solar factors on changes in atmospheric transparency indicators during powerful magnetic storms in March and April 2023. Regression models were constructed using a two-factor linear regression equation, in which the influencing factors were the ionospheric electric potential (EP) contrast and cosmic rays (CRs). It was shown that the determination coefficient increases in the constructed regression models, i.e. the selected factors increase the proportion of explained dispersion in atmospheric transparency characteristics. We assessed the degree of influence associated with each explanatory factor included in the regression models. It was found that CR is the factor that explains the largest proportion of dispersion in cloud parameters in the maximum water vapor layer (700–500 hPa). It was established that the relative contribution of CRs to the increase in explained dispersion of cloud parameter is equivalent to the contribution of the EP contrast, which explains the largest proportion of the dispersion in the contrast of outgoing longwave radiation. The obtained results illustrate the role of CRs in the electrical mechanism of the nonlinear impact of solar activity on the climate system, whose theoretical foundations are being developed at ISTP SB RAS.

Keywords: solar activity, cosmic rays, ionospheric electric potential, cloud, atmospheric transparency, all-sky camera, climate.

ВВЕДЕНИЕ

Основной особенностью последнего десятилетия продолжающегося глобального потепления является увеличение повторяемости экстремальных гидрометеорологических явлений в разных регионах земного

шара [Мохов, 2023; Ранькова и др., 2025; IPCC, 2023]. Ухудшение условий жизнедеятельности человека делает необходимым поиск дополнительных факторов, которые, наряду с углекислым газом, могут вносить вклад в наблюдаемые изменения окружающей среды. Солнечная активность (СА) является

одним из подобных факторов, входящих в группу малых воздействий на климатическую систему. К признакам данной группы можно отнести малую величину прямого воздействия, нелинейный характер воздействия и неоднородную пространственно-временную структуру отклика на воздействие. Отмеченные признаки лежат в основе вопроса о физическом механизме влияния СА на климатическую систему. Исследования, направленные на изучение солнечно-тропосферных связей, на основе инструментальных измерений проводятся около 150 лет [Georgieva, Veretenenko, 2023]. Первый их всплеск наблюдался во второй половине XX в. и был связан с освоением космического пространства и интенсивным формированием наземной сети наблюдений. Систематизация новых данных позволила зарегистрировать повышение приповерхностной температуры на планете, начавшееся в середине 1970-х и усилившееся в 1990-х гг. В начале 2000-х становится доступной спутниковая информация благодаря развитию сети Интернет и широкому распространению персональных компьютеров в России, вследствие чего на фоне продолжавшегося глобального потепления вновь увеличился интерес к исследованиям, связанным с влиянием солнечных процессов на состояние нижней атмосферы. Современные технологии и накопившийся объем данных позволяют сегодня, наряду с мониторингом климата, решать задачу по улучшению его прогнозирования. Для повышения уровня достоверности как оперативного прогноза погоды, так и прогноза климатических изменений на временах от нескольких десятилетий до сотни лет необходимо включать дополнительные параметризации в климатические модели, которые описывают взаимодействие атмосферных слоев в системе СА—магнитосфера—ионосфера—нижняя атмосфера. Последнее условие требует детального изучения физических процессов, протекающих в космическом пространстве от Солнца до Земли. Подробный обзор механизмов воздействия энергетических частиц галактического и солнечного происхождения на процессы во всех слоях атмосферы представлен в работе [Mironova et al., 2015]. Помимо корпускулярной радиации, в качестве агента воздействия на атмосферу рассматриваются вариации солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП), приводящие к изменениям глобальной электрической цепи (ГЭЦ) и формированию облачности в тропосфере, которая регулирует поступление солнечной радиации в нижнюю атмосферу [Tinsley, 2000; Harrison, Lockwood, 2020]. Электрический механизм нелинейного воздействия СА на тропосферу, теоретические основы которого разрабатываются в ИСЗФ СО РАН, обуславливает изменение уходящей части радиационного баланса климатической системы [Жеребцов и др., 2005]. Согласно данному механизму, вариации СА через изменения параметров СВ и ММП приводят к изменениям ГЭЦ, вследствие чего происходит перестройка вертикального профиля объемного электрического заряда, который влияет на кластерный состав водяного пара. Возрастание количества димеров и более крупных кластеров воды в молекулярном составе водяного пара приводит к увеличению его поглотительной способности в ИК-диапазоне

[Молодых и др., 2020]. Поскольку известно, что основным ионизатором атмосферы являются космические лучи (КЛ), которые, с одной стороны, увеличивают ее проводимость, а с другой — могут влиять на образование облачности в тропосфере, важно ответить на вопрос о роли КЛ в предлагаемом механизме влияния СА на климатическую систему.

Целью данной работы является определение вклада КЛ в электромагнитное взаимодействие между компонентами системы СА—магнитосфера—ионосфера—тропосфера во время мощных геомагнитных бурь.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Наше исследование выполнено на примере двух мощных геомагнитных бурь, зарегистрированных в марте и апреле 2023 г. текущего 25-го солнечного цикла (СЦ). СЦ 25 начался в январе 2020 г. и проходит в период пониженной СА. Динамика активности солнечных пятен на его ветви роста соответствует средним циклам согласно правилу Гневисшева—Оля. Его максимальная фаза началась в ноябре 2023 г. Минимум 25-го цикла ожидается в первой половине 2031 г. [Ермолаев и др., 2023; Язев и др., 2023; Ishkov, 2024]. Магнитная буря 23 марта характеризовалась понижением геомагнитного индекса Dst до -163 нТл, а во время геомагнитной бури 23 апреля Dst индекс составил -213 нТл по данным WDC Kyoto [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>]. Среднеширотный геомагнитный индекс K_p в обоих случаях достиг 8. Геомагнитные бури сопровождались форбуш-понижением нейтронной компоненты космических лучей (КЛ), которое превысило 6 % по данным NMDB Event Search Tool (NEST) [nmdb.eu/nest/].

В качестве исходных данных мы использовали электрический потенциал (ЭП) ионосферы, рассчитанный на основе улучшенной полуэмпирической модели Веймера 2005 г. [Weimer, 2005]. Данные о межпланетной среде и индексы геомагнитной активности с часовым разрешением получены из базы данных OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html]. Показателем энергии солнечного ветра в магнитосфере является PCN-индекс геомагнитной активности, описывающий возмущенность магнитного поля Земли в полярной шапке Северного полушария при изменении скорости и плотности солнечной плазмы и ММП [Трошичев, Сормаков, 2021]. Данные по КЛ получены с помощью нейтронного монитора высокоширотной станции «Норильск» (69° N, 88° E), их часовые значения исправлены на давление [<http://cgm.iszf.irk.ru/>]. Параметрами облачности являются балл облачности и показатели содержания воды (Liquid Water Path) и льда (Ice Water Path) в облаке. Балл облачности характеризует количество облаков в процентных долях покрытия неба. Показатели содержания воды/льда — это масса капель воды/ледяных частиц во всем облачном столбе на единицу площади поверхности. Уходящая длинноволновая радиация (УДР) представлена наблюдаемым широкополосным тепловым потоком на верхней границе тропосферы (высота

$h \sim 20$ км). В работе использованы часовые значения метеовеличин в сетке $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ из набора спутниковых данных CERES [Wielicki et al., 1996; <https://ceres.larc.nasa.gov/data/>].

Контраст ЭП ионосферы, усредненный для широт выше 60° N, использовался в качестве гелиогеофизического параметра, связанного с вариациями параметров СВ. Контраст ЭП представляет собой разность аномалий потенциала, усредненных по областям одного знака. Аномалии рассчитывались от среднего за семь дней, предшествующих дню начала магнитной бури. Расчет ЭП по модели Веймера выполнялся на основе часовых значений параметров межпланетной среды: скорости СВ, плотности протонов плазмы, B_y - и B_z -компонент ММП, а также AL -индекса геомагнитной активности. Вариации КЛ представлены аномалиями относительно спокойного периода с 16 по 22 марта для магнитной бури 23 марта 2023 г. и с 11 по 17 апреля для геомагнитной бури 23 апреля 2023 г. Для всех анализируемых в работе метеопараметров рассчитывался контраст величины, представляющий собой разность положительных и отрицательных аномалий, которые получены как отклонения от среднего за семь дней, предшествующих дню начала магнитной бури.

Статистический анализ данных проведен с помощью метода множественной линейной регрессии (МЛР), используемого для прогнозирования значений одной зависимой переменной на основе двух или нескольких независимых переменных. Линейная модель строится с применением метода наименьших квадратов для минимизации ошибки при подборе данных к наблюдаемым значениям отдельной переменной. Метод МЛР позволяет оценить степень влияния каждого объясняющего фактора, исключив влияние остальных объясняющих факторов, включенных в модель. Регрессионная модель строилась по уравнению двухфакторной линейной регрессии

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (1)$$

где a — коэффициент, показывающий, какой будет переменная y в случае, когда объясняющие факторы $x_1, x_2 = 0$; b_1, b_2 — коэффициенты, которые описывают степень зависимости переменной y от объясняющих факторов x_1, x_2 .

Коэффициент детерминации является основным показателем качества регрессионной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели. Коэффициент множественной детерминации показывает, какая доля дисперсии зависимой переменной обусловлена влиянием на нее изменений объясняющих факторов, включенных в модель. Статистическая надежность уравнения регрессии и коэффициента детерминации оценена с помощью F -критерия Фишера. Нулевая гипотеза H_0 состоит в одновременном равенстве нулю всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных, т. е. ни одна из объясняющих переменных, включенных в регрессию, не оказывает существенного влияния на зависимую переменную. Гипотеза H_1 говорит о том, что выборочный коэффициент детерминации не равен нулю. Принятие гипотезы H_1 означает, что по крайней мере одна из объясняющих

переменных, включенных в регрессию, оказывает существенное влияние на переменную y . Для оценки значимости коэффициента детерминации используется статистика, имеющая F -распределение Фишера (правосторонняя проверка) с $f_1 = m = 2$ и $f_2 = n - m - 1$ степенями свободы. Вычисленное значение статистики F сравнивается с ее критическим значением $F_{кр}$, найденным по приведенной в [Ферстер, Ренц, 1983] таблице при заданном уровне значимости α и соответствующем числе степеней свободы. Если $F > F_{кр}$, то вычисленный коэффициент детерминации значим с вероятностью $1 - \alpha$ [Ферстер, Ренц, 1983; Чавро, Дымников, 2000].

Для достоверной оценки степени зависимости метеопараметров от влияния солнечных факторов с помощью метода МЛР необходимо условие слабой линейной связи между независимыми переменными, а именно контрастом ЭП и аномалиями КЛ во время возмущений, которое выполняется в представленных случаях (рис. 1). В возмущенный период, длительность которого составила 26 ч в обоих случаях, коэффициент корреляции между объясняющими факторами равен -0.23 для мартовской бури и -0.25 для апрельской бури. Во временной динамике характеристик солнечной активности отметим высокую корреляцию между изменениями контраста ЭП и вариациями геомагнитного индекса PCN .

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе исследования рассчитаны парные коэффициенты корреляции контраста параметров облачности в слоях тропосферы, таких как балл облачности и показатели содержания воды и льда в облаке, с солнечными факторами — контрастом ЭП, геомагнитным индексом PCN и аномалиями КЛ (табл. 1).

Анализ коэффициентов корреляции показал, что в слое максимального содержания водяного пара (700–500 гПа) наблюдается положительная корреляция КЛ со всеми параметрами облачности во время магнитной бури 23 марта и отрицательная линейная зависимость между КЛ и параметрами облачности во время геомагнитной бури 23 апреля. Таким образом, проиллюстрированы два физических механизма воздействия КЛ на тропосферу. Исходя из того, что КЛ являются основным ионизатором атмосферы, они, с одной стороны, могут влиять на образование облачности в тропосфере. С увеличением интенсивности КЛ возрастает концентрация ионов в тропосфере, которые способствуют росту водяных кластеров и, следовательно, формированию облачности. И наоборот, как во время магнитной бури 23 марта, при уменьшении интенсивности КЛ уменьшается контраст параметров облачности — ее балла и содержания воды и льда в облаке. С другой стороны, КЛ изменяют проводимость тропосферы. При уменьшении концентрации ионов происходит уменьшение проводимости воздуха в безоблачных областях тропосферы, которое приводит к увеличению разности потенциала ионосфера—Земля. В соответствии с механизмом, разрабатываемым в ИСЗФ СО РАН, это приводит к увеличению концентрации водяных клас-

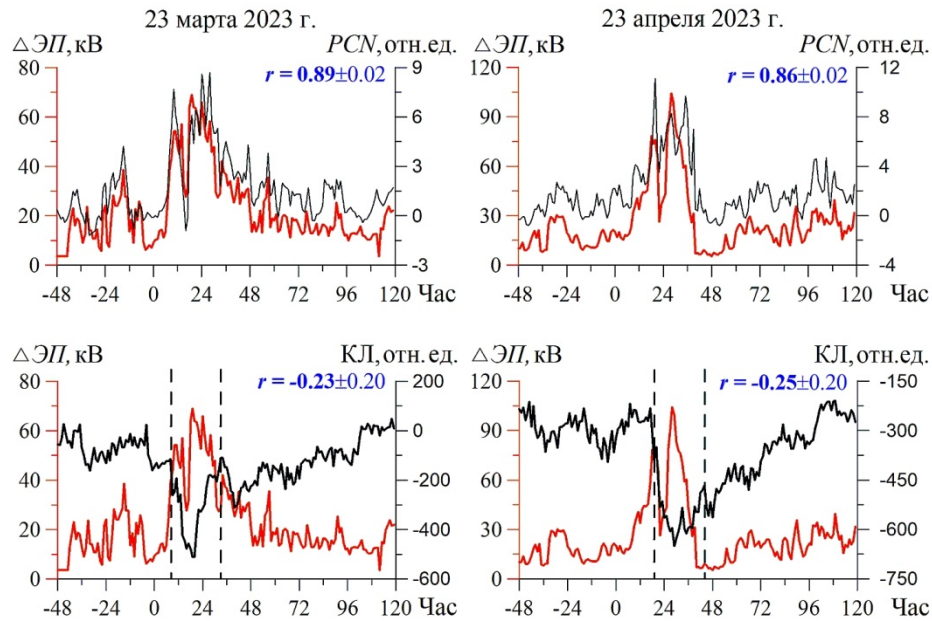


Рис. 1. Изменения контраста ЭП, усредненного для широт выше 60° N (красная линия), геомагнитного индекса *PCN* (серая линия) и аномалий КЛ (черная линия). Ноль по оси абсцисс — 00 UT дня начала геомагнитной бури. Возмущенный период показан вертикальными штриховыми линиями

Таблица 1

Коэффициенты корреляции контраста параметров облачности с солнечными факторами — контрастом ЭП, индексом *PCN* и аномалиями КЛ — во время мощных магнитных бурь

	Общая			1000–700 гПа			700–500 гПа			500–300 гПа			300 гПа – тропопауза		
	Балл	LWP	IWP	Балл	LWP	IWP	Балл	LWP	IWP	Балл	LWP	IWP	Балл	LWP	IWP
23 марта 2023 г.															
ΔЭП	0.005	–0.05	–0.29	0.06	–0.20	–0.55	0.32	0.003	–0.34	–0.05	–0.18	–0.02	0.33	0.32	0.40
<i>PCN</i>	0.26	0.02	–0.38	0.09	–0.16	–0.51	0.60	0.50	0.15	–0.02	0.27	0.36	0.40	0.13	–0.10
КЛ	0.29	0.11	0.02	0.09	–0.02	–0.09	0.56±0.17	0.79±0.13	0.76±0.13	–0.02	0.67±0.15	0.72±0.14	0.04	–0.28	–0.84
23 апреля 2023 г.															
ΔЭП	–0.38	0.33	0.51	–0.20	0.33	0.12	–0.09	0.44	0.25	0.05	0.13	–0.06	0.42	0.02	0.24
<i>PCN</i>	–0.04	0.50	0.44	–0.09	0.44	0.20	–0.05	0.49	0.25	0.27	0.17	–0.10	0.49	0.04	–0.09
КЛ	0.22	0.07	–0.45	0.10	–0.26	–0.12	–0.10	–0.61±0.16	–0.63±0.16	–0.44±0.18	0.30±0.19	–0.37±0.19	0.23	0.63	–0.66

теров, а, следовательно, и облачности преимущественно верхнего яруса. Данный эффект проявился во время геомагнитной бури 23 апреля, когда уменьшение КЛ сопровождалось возрастанием контраста параметров облачности.

На основе метода МЛР оценена степень зависимости параметров облачности от влияния солнечных факторов во время мощных магнитных бурь с использованием вычисленных параметров: r^2 — коэффициента парной детерминации; b_1 и b_2 — рассчитанных коэффициентов, описывающих степень зависимости параметров облачности от объясняющих факторов в уравнении регрессии; R — коэффициента множественной корреляции; R^2 — коэффициента множественной детерминации; F — вычисленного значения статистики, имеющей F -распределение Фишера, для оценки значимости R^2 (табл. 2). Критическое значение статистики $F_{кр}$, найденное по таблице из [Ферстер, Ренц, 1983], составило 3.42 при уровне значимости 5 % и 5.66 при $\alpha=1$ %. Контраст ЭП применялся в расчетах в качестве первого фактора, влияющего на параметры облачности в слое максимального содержания водяного пара, за исключением расчета зависимости балла облачности от влияния солнечных факторов во время апрельской магнитной бури, в котором первым фактором являлся геомагнитный индекс *PCN*.

Получено, что в построенных регрессионных моделях квадрат коэффициента множественной корреляции, или коэффициент детерминации, увеличивается, т. е. данный набор переменных, состоящий из контраста ЭП и КЛ, позволяет увеличить долю объясненной дисперсии зависимых переменных — балла облачности и показателей содержания воды и льда. Прирост объясненной дисперсии за счет каждого фактора оценен на основе анализа коэффициентов, описывающих степень зависимости параметров облачности от объясняющих факторов (ΔЭП и КЛ) в уравнениях регрессии. Обнаружено, что КЛ объясняют наибольшую долю дисперсии параметров облачности в слое максимального содержания водяного пара (рис. 2).

Наряду с облачностью, УДР можно рассматривать в качестве характеристики прозрачности атмосферы. Коэффициенты корреляции контраста УДР с солнечными факторами — контрастом ЭП, *PCN*-индексом и аномалиями КЛ — во время магнитных бурь в марте и апреле 2023 г. приведены в табл. 3.

Получено, что во время магнитной бури 23 марта преобладает механизм влияния КЛ, связанный с облакообразованием в тропосфере, а возрастание контраста ЭП сопровождается уменьшением контраста УДР. В течение геомагнитной бури 23 апреля КЛ являются

Таблица 2

Вычисленные параметры для оценки степени зависимости контраста параметров облачности от объясняющих факторов — контраста ЭП (1) и аномалий КЛ (2)

	r^2_1	r^2_2	b_1	b_2	R	R^2	F
23 марта 2023 г.							
Балл	0.1024	0.3136	0.48	0.67	0.73	0.5329	13.12
LWP	0.0324	0.4489	-0.025	0.67	0.675	0.46	9.60
IWP	0.1156	0.5776	-0.175	0.72	0.78	0.6084	17.87
23 апреля 2023 г.							
Балл	0.0729	0.1936	0.24	-0.43	0.50	0.25	3.83
LWP	0.1936	0.3721	0.31	-0.54	0.685	0.4692	10.17
IWP	0.0625	0.3969	0.095	-0.61	0.64	0.4096	7.98

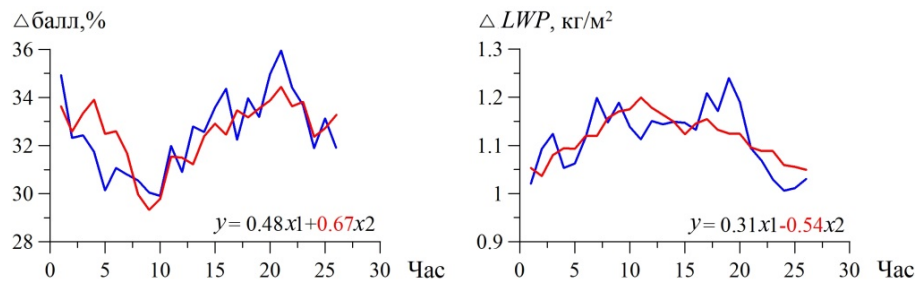


Рис. 2. Изменения контраста балла облачности во время магнитной бури 23 марта (слева) и контраста содержания воды в облаке во время геомагнитной бури 23 апреля (справа): синяя линия — исходный ряд; красная линия — ряд, рассчитанный по уравнениям регрессии

Таблица 3

Коэффициенты корреляции контраста УДР с контрастом ЭП, PCN-индексом и аномалиями КЛ во время мощных магнитных бурь

	23 марта 2023 г.	23 апреля 2023 г.
$\Delta ЭП$	-0.68 ± 0.15	0.76 ± 0.13
PCN	-0.43 ± 0.18	0.77 ± 0.13
КЛ	0.32 ± 0.19	-0.34 ± 0.19

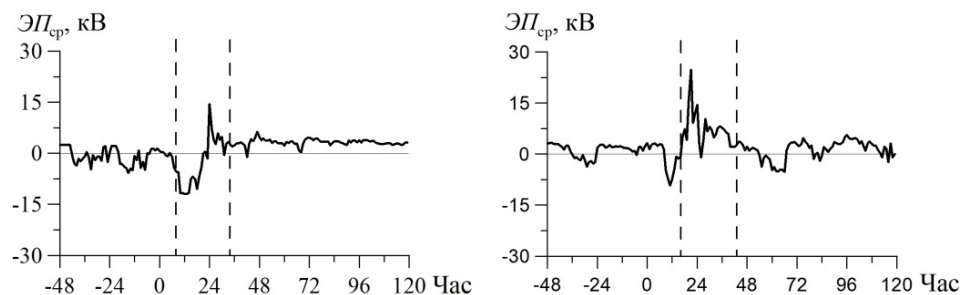


Рис. 3. Изменения ЭП, усредненного для широт выше 60° N, во время геомагнитных бурь 23 марта (слева) и 23 апреля (справа) 2023 г. Ноль по оси абсцисс — 00 UT дня начала геомагнитной бури. Возмущенный период показан вертикальными штриховыми линиями

дополнительным фактором, уменьшающим проводимость тропосферы, и при возрастании контраста ЭП наблюдается увеличение контраста УДР. На рис. 3 представлена временная динамика ЭП, усредненного для широт выше 60° N, во время геомагнитных бурь. Анализ вариаций среднего ЭП во время мощных магнитных бурь показал, что контраст ЭП коррелирует с контрастом УДР в возмущенный период во время апрельской магнитной бури, когда преобладают положительные аномалии потенциала. Следовательно, отклик контраста УДР на вариации контраста ЭП зависит от величины изменения положительных аномалий потенциала во время возмущения.

Проведена оценка степени зависимости контраста УДР от контраста ЭП и аномалий КЛ во время геомагнитных бурь с помощью метода МЛР (табл. 4). Получено, что коэффициент детерминации увеличивается в течение возмущений, т. е. выбранные солнечные факторы позволяют увеличить долю объясненной дисперсии контраста УДР. Оценка прироста объясненной дисперсии за счет каждого фактора показала, что контраст ЭП объясняет наибольшую долю дисперсии контраста УДР. Регрессионные модели показаны на рис. 4.

Происходящее в настоящее время интенсивное технологическое развитие позволяет получать данные

Таблица 4

Вычисленные параметры для оценки степени влияния объясняющих факторов на зависимую переменную (контраст УДР, число звезд)							
	r^2_1	r^2_2	b_1	b_2	R	R^2	F
23 марта 2023 г.							
УДР	0.4624	0.1024	-0.64	0.17	0.70	0.49	11.05
23 апреля 2023 г.							
УДР	0.5776	0.1156	0.72	-0.16	0.78	0.6084	17.87
11 мая 2024 г.							
Число звезд	0.1325	0.0144	0.43	0.11	0.38	0.1444	5.82

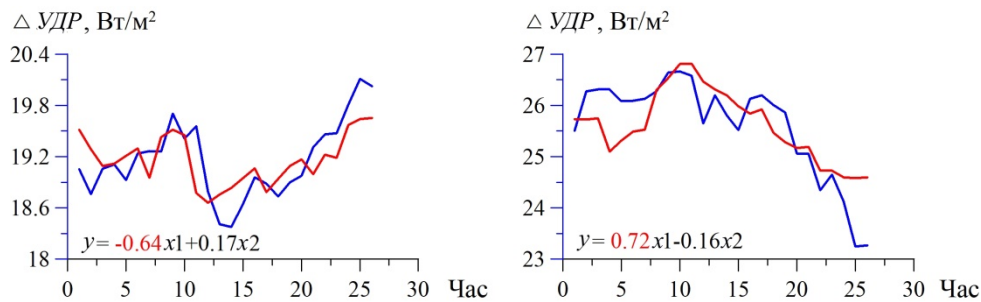


Рис. 4. Изменение контраста УДР во время геомагнитных бурь 23 марта 2023 г. (слева) и 23 апреля 2023 г. (справа): синяя линия — исходный ряд; красная линия — ряд, рассчитанный по уравнениям регрессии

более высокого уровня и сопровождается как уточнением старых, так и появлением новых методик обработки данных. Это позволило нам применить метод МЛР к данным с высоким временным разрешением. Благодаря усовершенствованию наземных инструментов, в частности камер всего неба для регистрации собственного излучения верхней атмосферы Земли, и изменениям, внесенным в методику обработки их изображений [Сыренова и др., 2021], появилась возможность использовать число звезд на небосводе в качестве показателя, который косвенно описывает условия прозрачности всей толщи атмосферы. Камеры всего неба расположены в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (с. Торы, Республика Бурятия), инструменты которой включены в Национальный гелиогеофизический комплекс РАН. Установлено снижение числа звезд относительно их среднего количества на небосводе (1200 штук) на изображениях, полученных камерой всего неба в условиях сильнейшей магнитной бури 10–11 мая 2024 г., во время которой наблюдалось форбуш-понижение галактических КЛ, а на его фазе восстановления произошло возрастание солнечных КЛ [Махмутов и др., 2025; Ясюкевич и др., 2025].

Проведем оценку степени зависимости числа звезд от влияния солнечных факторов — геомагнитного индекса PCN и аномалий КЛ. Корреляция между объясняющими факторами составила -0.55 ± 0.08 , т. е. условие слабой линейной связи между объясняющими факторами выполняется и метод МЛР можно применить в данном случае. Геомагнитный индекс PCN с одноминутным временным разрешением представлен на сайте [https://pcindex.org]. Информация о КЛ получена из базы данных Иркутского спектрографа КЛ, которая содержит данные нейтронного монитора ст. «Иркутск», исправленные на давление [http://cgm.iszf.irk.ru/]. Анализовались

данные, полученные с 14 по 19 UT 11 мая 2024 г. с временным разрешением 5 мин. Значение $F_{кр}$, найденное по таблице, составило 3.13 при уровне значимости 5 % и 4.92 при $\alpha = 1$ %. С использованием метода МЛР для оценки степени зависимости числа звезд от геомагнитного индекса PCN и аномалий КЛ было обнаружено увеличение коэффициента детерминации во время возмущения. Оценка прироста объясненной дисперсии за счет каждого фактора показала, что геомагнитный индекс PCN объясняет наибольшую долю дисперсии числа звезд на небосводе (см. табл. 4). Следовательно, понижение прозрачности атмосферы обусловлено процессами электромагнитного взаимодействия всех атмосферных слоев во время гелиогеофизического события.

Проиллюстрируем полученный результат на примере динамики среднего балла облачности в слое 500–300 гПа и суммарного относительного вклада обоих факторов, рассчитанного для всего возмущенного периода с 16 UT 10 мая по 05 UT 12 мая (рис. 5). Как видно из рисунка, верхняя облачность изменяется со сдвигом в 3 ч по отношению к относительным вариациям влияющих факторов с коэффициентом корреляции 0.55 ± 0.14 . Таким образом, использование весьма общей характеристики прозрачности атмосферы (число звезд) на ограниченном временном периоде, но с высоким временным разрешением данных, позволило получить регрессионные коэффициенты и рассчитать относительный вклад объясняющих факторов на всем временном интервале возмущения, что дало возможность сопоставить его с изменением принятого параметра облачности.

ОБСУЖДЕНИЕ

Первая четверть 21-го века характеризуется увеличением повторяемости опасных явлений, приводящих

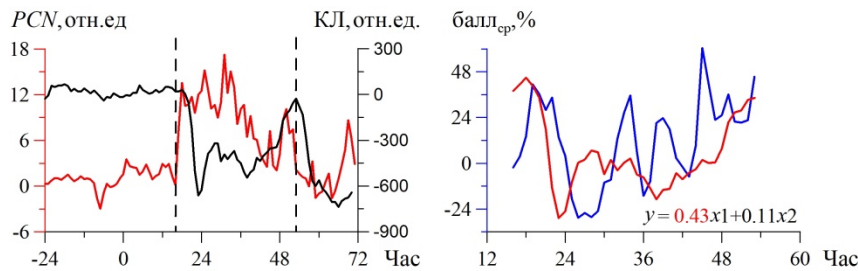


Рис. 5. Левая панель — изменения геомагнитного индекса PCN (красная линия) и аномалий КЛ (черная линия) во время мощной магнитной бури 10–11 мая 2024 г.; вертикальными штриховыми линиям отмечен возмущенный период; правая панель — динамика среднего балла облачности в слое 500–300 гПа (синяя линия) и регрессионная модель (красная линия) в возмущенный период

к катастрофическим разрушениям в разных районах земного шара. Повышение уровня достоверности их прогнозирования на временном масштабе от нескольких дней до нескольких десятилетий поможет снизить материальные затраты на проведение восстановительных работ и улучшить качество жизни населения. Для решения прогностической задачи необходимо подробное изучение не только внутренней изменчивости климатической системы, но и влияния внешних по отношению к системе процессов. К последним относится солнечная активность (СА) — совокупность физических явлений, происходящих на Солнце. В данной работе изучен вопрос о роли КЛ в электрическом механизме нелинейного воздействия СА на климатическую систему, теоретическая модель которого разрабатывается в ИСЗФ СО РАН.

Методом МЛР выполнена оценка степени зависимости показателей прозрачности атмосферы от солнечных факторов во время мощных магнитных бурь в марте и апреле 2023 г. Показано, что в построенных регрессионных моделях набор независимых переменных, состоящий из контраста ЭП и КЛ, позволяет увеличить долю объясненной дисперсии зависимых переменных — балла облачности, показателей содержания воды/льда и УДР (см. рис. 2, 4). Полученные результаты иллюстрируют два механизма влияния КЛ на тропосферу: с одной стороны, преобладает механизм влияния КЛ, связанный с облакообразованием в тропосфере во время магнитной бури 23 марта, с другой стороны, КЛ являются дополнительным фактором, уменьшающим проводимость тропосферы во время геомагнитной бури 23 апреля, что согласуется с результатами исследования [Петухова и др., 2023]. Следует отметить, что относительный вклад КЛ в прирост объясненной дисперсии параметров облачности равнозначен вкладу контраста ЭП, которым объясняется наибольшая доля дисперсии контраста УДР.

Благодаря усовершенствованию наземных оптических инструментов и созданию баз данных с высоким временным разрешением появилась возможность использовать в данном исследовании число звезд в качестве косвенной характеристики прозрачности атмосферы. Для ограниченного временного периода с помощью метода МЛР получены регрессионные коэффициенты, которые позволили рассчитать относительный вклад объясняющих фак-

торов на весь временной интервал возмущения и сопоставить его с изменением среднего балла верхней облачности в отдельном регионе (см. рис. 5). Следовательно, обновление методик обработки данных современных оптических инструментов способствует появлению дополнительных характеристик атмосферы, которые можно использовать в дальнейших исследованиях при отсутствии данных наблюдений метеорологических величин с высоким временным разрешением.

ВЫВОДЫ

Анализ влияния солнечных факторов (контраста ЭП и КЛ) на изменение показателей прозрачности атмосферы во время мощных магнитных бурь с помощью метода МЛР позволил получить следующие результаты.

Выявлено увеличение коэффициента детерминации в построенных регрессионных моделях, т. е. выбранные факторы (ΔЭП и КЛ) увеличивают долю объясненной дисперсии характеристик прозрачности атмосферы.

Обнаружено, что КЛ являются фактором, который объясняет наибольшую долю дисперсии параметров облачности в слое максимального содержания водяного пара (700–500 гПа) во время мощных геомагнитных бурь.

Оценка прироста объясненной дисперсии за счет двух солнечных факторов показала, что контраст ЭП объясняет наибольшую долю дисперсии УДР.

Получено, что положительный линейный отклик контраста УДР на вариации контраста ЭП определяется величиной изменений положительных аномалий потенциала во время гелиогеофизических возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН [<https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/>]. Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Оптические инструменты» ИСЗФ СО РАН [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138180/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Хохлачев А.А. и др. Параметры солнечного ветра на фазе роста 25-го солнечного цикла: сходства и различия с 23-м и 24-м солнечными

- циклами. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 4, с. 63–70. <https://doi.org/10.12737/szf-94202307> / Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., et al. Solar wind parameters in rising phase of solar cycle 25: Similarities and differences with solar cycles 23 and 24. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 4, pp. 55–62. <https://doi.org/10.12737/stp-94202307>.
- Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли. *Оптика атмосферы и океана*. 2005, т. 18, № 12, с. 1042–1050.
- Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Филиппов М.В. и др. Особенности проявлений солнечной активности в космических лучах 10–11 мая 2024 г. *Космические исследования*. 2025, т. 63, № 6, с. 663–673. <https://doi.org/10.7868/S3034550225060081>.
- 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. <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. <https://doi.org/10.31857/S0002351523070106>.
- Петухова А.С., Петухов И.С., Петухов С.И., Готовцев И.С. Особенности динамики параметров среды и плотности космических лучей в сильных форбуш-понижениях, связанных с магнитными облаками. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 2, с. 94–100. <https://doi.org/10.12737/szf-92202311> // Petukhova A.S., Petukhov I.S., Petukhov S.I., Gotovtsev I.S. Peculiarities of medium parameter dynamics and cosmic ray density in strong Forbush decreases associated with magnetic clouds. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 88–93. <https://doi.org/10.12737/stp-92202311>.
- Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф., Антипина У.И., Смирнов В.Д. Особенности температурного режима у поверхности земного шара в 2024 году. Современное состояние глобального потепления. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2025, т. 11, № 2, с. 237–279. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2025-2-237-279>.
- Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. Географическая привязка кадров широкоугольных оптических систем. *Журнал технической физики*. 2021, т. 91, № 12, с. 1990–1996. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.12.51765.172-21>.
- Трошичев О.А., Сормаков Д.А. Мониторинг космической погоды по данным наземных магнитных наблюдений (индекс PC). *Метеорология и гидрология*. 2021, № 3, с. 12–27. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-3-12-27>.
- Ферстер Э., Ренц Б. *Методы корреляционного и регрессионного анализа*. М.: Финансы и статистика, 1983, 302 с.
- Чавро А.И., Дымников В.П. *Методы математической статистики в задачах физики атмосферы: курс лекций*. М.: ИВМ РАН, 2000, 210 с.
- Язев С.А., Исаева Е.С., Хос-Эрдэнэ Б. 25-й цикл солнечной активности: первые три года. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 3, с. 5–11. <https://doi.org/10.12737/szf-93202301> / Yazev S.A., Isaeva E.S., Khos-Erdene B. Solar activity cycle 25: The first three years. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 3, pp. 3–9. <https://doi.org/10.12737/stp-93202301>.
- Ясюкевич Ю.В., Васильев Р.В., Рубцов А.В. и др. Экстремальная магнитная буря 10–19 мая 2024 г.: взаимодействие нейтральной и заряженной компонент верхней атмосферы и воздействие на радиотехнические системы. *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2025, т. 521, № 1, с. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2686739725030161>.
- Georgieva K., Veretenenko S. Solar influences on the Earth's atmosphere: Solved and unsolved questions. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2023, vol. 10, iss. 12, 1244402. <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1244402>.
- Harrison R.G., Lockwood M. Rapid indirect solar responses observed in the lower atmosphere. *Proc. Roy. Soc. A*. 2020, vol. 476, iss. 2241, 20200164. <https://dx.doi.org/10.1098/rspa.2020.0164>.
- IPCC, 2023: Sections. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Ishkov V.N. Current solar cycle 25 on the eve of the maximum phase. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024, vol. 64, iss. 7, pp. 1167–117. <https://doi.org/10.1134/S0016793224700257>.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4>.
- 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, pp. 231–258.
- Weimer D.R. Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, iss. A5, A05306. <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. Amer. Meteor. Soc.* 1996, vol. 77, iss. 5, pp. 853–868. URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 10 мая 2026 г.).
- URL: nmdb.eu/nest/ (дата обращения 10 мая 2026 г.).
- URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (дата обращения 10 мая 2026 г.).
- URL: <http://cgm.iszf.irk.ru/> (дата обращения 10 мая 2026 г.).
- URL: <https://ceres.larc.nasa.gov/data/> (дата обращения 10 мая 2026 г.).
- URL: <https://pcindex.org> (дата обращения 10 мая 2026 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/> (дата обращения 10 мая 2026 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138180> (дата обращения 10 мая 2026 г.).
- Как цитировать эту статью:*
Караханян А.А., Молодых С.И., Подлесный С.В. Многофакторный регрессионный анализ показателей прозрачности атмосферы во время мощных магнитных бурь в 25-м солнечном цикле. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 3, с. 134–141. <https://doi.org/10.12737/szf-123202614>.