

УДК 551.590.21

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА УХОДЯЩИЙ ПОТОК ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2020 г. С. И. Молодых<sup>1, \*</sup>, Г. А. Жеребцов<sup>1, \*\*</sup>, А. А. Караханян<sup>1, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

\*e-mail: sim@iszf.irk.ru

\*\*e-mail: gaz@iszf.irk.ru

\*\*\*e-mail: asha@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 26.04.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Для модели длинноволновой уходящей радиации, основанной на интегральной функции пропускания, предложена параметризация механизма влияния солнечной активности на тропосферу Земли, разрабатываемого авторами. В качестве индикатора солнечной активности использовался *PC*-индекс геомагнитной активности, который разработан для контроля магнитной активности в полярной шапке и отражает влияние межпланетного электрического поля на магнитосферу. На основе данных реанализа NCEP/NCAR проведены расчеты интегральной функции пропускания и уходящего длинноволнового потока для периодов повышенной и пониженной солнечной активности. Корреляционный анализ рассчитанных радиационных характеристик с температурой в слое 925–700 гПа показал, что учет солнечной активности приводит к усилению связи между радиационными характеристиками и температурой. Сравнение результатов расчетов с изменением температуры подтвердило, что предложенная параметризация может быть применена для учета влияния солнечной активности в численных моделях, использующих интегральную функцию пропускания, для расчета длинноволновой уходящей радиации.

DOI: 10.31857/S0016794020020108

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о влиянии солнечной активности на состояние климатической системы Земли активно обсуждается исследователями в связи с дискуссией о природе современного потепления климата. По данным инструментальных наблюдений особенностью климатических условий последних трех десятилетий является увеличение скорости повышения приповерхностной температуры в высокоширотных регионах [Mokhov, 2017]. Для оценки будущих изменений климата необходимо, наряду с антропогенными факторами, включать в климатические модели новые параметризации, описывающие взаимосвязи естественных факторов (солнечная и вулканическая активность) с процессами в нижней атмосфере. Во время активных процессов на Солнце происходит увеличение интенсивности коротковолновой радиации (рентгеновский и ультрафиолетовый диапазоны длин волн) и корпускулярного излучения (вариации солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), изменение потоков космических лучей). Кроме того, влияние рассматриваемых факторов на атмосферу не

одинаково как по величине, так и по характеру изменений атмосферных процессов. По модельным расчетам прямое энергетическое воздействие вариаций потока солнечного излучения на приповерхностную температуру существенно меньше влияния углекислого газа [Mokhov, 2012], поэтому идут поиски параметрических механизмов, в которых небольшие воздействия на параметры, влияющие на радиационный баланс климатической системы, могут приводить к существенным изменениям в системе, величина которых связана с амплитудой воздействия. К таким механизмам можно отнести воздействие на радиационный баланс в тропосфере, обусловленное изменениями в глобальной электрической цепи вследствие вариаций солнечного ветра и ММП [Жеребцов и др., 2005; Tinsley, 2000; Kniveton et al., 2008]. Отметим, что в триггерных механизмах, в отличие от параметрических, предполагается скачкообразный переход климатической системы из одного устойчивого состояния в другое, который происходит при слабом воздействии, превышающем пороговое значение. В ряде работ проводится анализ воздействия галактиче-

ских космических лучей (ГКЛ) на аэрозольный и малый газовый состав атмосферы [Пудовкин и Распопов, 1992; Svensmark and Friis-Christensen, 1997; Mironova et al., 2015]. Исследования проведенные в рамках международного проекта “CLOUD” показали, что вариации ГКЛ не могут существенно влиять на климат, несмотря на то, что ионы оказывают значительное влияние на процессы образования и роста аэрозолей в атмосфере [Dunne et al., 2016, (<http://cloud.web.cern.ch/cloud/>)].

Радиационный баланс системы Земля–атмосфера состоит из приходящего потока солнечной радиации и уходящего из нее в околоземное пространство. Благодаря наличию в климатической системе обратных связей многолетние изменения радиационного баланса не отличаются существенно от нуля. Результаты модельных расчетов свидетельствуют о сравнительно малой роли вариаций солнечного излучения в изменениях глобальной среднегодовой приповерхностной температуры по сравнению с влиянием углекислого газа [Мохов и др., 2006]. В связи с этим в механизме воздействия солнечной активности (СА) на климатическую систему [Жеребцов и др., 2005], разрабатываемом в ИСЗФ СО РАН, предполагается, что СА влияет на поглощение длинноволновой части спектра ( $\lambda > 4$  мкм). Простая линейная параметризация рассматриваемого механизма предложена в работе [Karakhanyan and Molodykh, 2018].

Целью данной работы является анализ изменений уходящего потока длинноволнового излучения, рассчитанного на основе интегральной функции пропускания для длинноволновой радиации в атмосфере, связанных с гелиогеофизическими возмущениями.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

При решении задачи о влиянии отдельного фактора на радиационные характеристики атмосферы удобно использовать простые полуэмпирические радиационные модели. Эти модели, в отличие от спектральных радиационных моделей [Розанов и Фролькис, 1993], содержат минимальное число эмпирически задаваемых параметров атмосферы с явным включением основных факторов, оказывающих влияние на изменения составляющих климатической системы. Кроме того, простые модели однородной (для безоблачной атмосферы) или двух-трехслойной атмосферы (для учета горизонтально-однородной облачности) позволяют проводить многочисленные ансамблевые расчеты с высокой вычислительной эффективностью.

В данной работе использована параметризация длинноволновой уходящей радиации для климатических моделей [Мохов и Петухов, 1978] с учетом механизма воздействия солнечной активности (СА) на климатическую систему Земли, приведенного в работе [Жеребцов и др., 2005]. Согласно данному физическому механизму воздействия СА на тропосферу предполагается, что вариации СА через изменения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) влияют на магнитосферную конвекцию, которая, в свою очередь, влияет на распределение разности электрического потенциала между ионосферой и Землей. Отметим, что вариации параметров солнечного ветра и ММП могут вызывать изменения геомагнитной активности, именно поэтому характеризующие ее индексы, можно использовать в качестве индикатора СА. Далее, изменения разности электрических потенциалов ионосфера–Земля приводят к перестройке вертикального профиля объемного электрического заряда, который влияет на состояние водяного пара (основного парникового газа) и, следовательно, на радиационный баланс, в частности, на уходящий длинноволновой поток. Отметим, что значительная роль ионов в процессе образования кластеров в атмосфере подтверждается результатами экспериментальных исследований проведенных в рамках международного проекта “CLOUD” [Wagner et al., 2017].

В качестве индикатора СА нами выбран *PC*-индекс геомагнитной активности ([http://www.geophys.aari.ru/pc\\_about.html](http://www.geophys.aari.ru/pc_about.html)). *PC*-индекс разработан для контроля магнитной активности в полярной шапке (*PCN* – в северной, а *PCS* – в южной полярной шапке), обусловленной геоэффективным солнечным ветром, и отражает межпланетное электрическое поле, влияющее на магнитосферу [Troshichev et al., 1988]. Вариации *PCN*-индекса хорошо согласуются с вариациями *AL*-индекса. [Troshichev and Janzhura, 2009]. Поскольку *PC*-индекс характеризует степень магнитной возмущенности в полярной шапке в целом, в формулу введен дополнительный множитель  $\exp(-(\varphi - \varphi_0)^2/d\varphi^2)$ , учитывающий широтную зависимость. Кроме того, вместо самого *PC*-индекса мы используем  $\lg|PC|$ , что обусловлено большим диапазоном его изменений. Таким образом, учитывая вышеизложенное, в качестве характеристики воздействия гелиогеофизических возмущений на состояние водяного пара можно использовать следующее выражение:

$$(1 + a \lg|PC| \exp(-(\varphi - \varphi_0)^2/d\varphi^2)).$$

Простая модель длинноволновой уходящей радиации основана на использовании интегральной функции пропускания для длинноволновой радиации в атмосфере. Полуэмпирическое выражение [Мохов и Петухов, 1978] для расчета интегральной функции пропускания преобразовано с включением солнечного фактора. Согласно механизму влияния СА на тропосферу, развиваемому в ИСЗФ СО РАН, под воздействием гелиогеофизических возмущений изменяется как фазовое состояние водяного пара (усиливается образование вторичных частиц в атмосфере), так и кластерный состав (увеличивается количество димеров и более крупных кластеров). Сечение поглощения длинноволнового излучения у кластеров воды существенно больше, чем у молекул воды [Дубов и Востриков, 2010]. Поэтому воздействие гелиогеофизических возмущений на интегральную функцию пропускания можно параметризовать с помощью множителя  $(1 + a \lg|PC| \exp(-(\varphi - \varphi_0)^2/d\varphi^2))$  в выражении для эффективной массы водяного пара. В этом случае формула для расчета интегральной функции пропускания будет иметь вид

$$D(M_1, M_2) = \frac{1}{A_0 (\beta_0 M_1^*)^{\beta_1} + 1} \frac{1 + A_2' A_2 (\beta_0 M_2)^{\beta_2}}{1 + A_2 (\beta_0 M_2)^{\beta_2}}, \quad (1)$$

где:  $M_1^* = M_1(1 + a \lg|PC| \exp(-(\varphi - \varphi_0)^2/d\varphi^2))$  – эффективная масса водяного пара с учетом параметризации СА;  $a = 0.2$ ;  $PC$  – индекс геомагнитной активности;  $\varphi$  – географическая широта;  $\varphi_0$  – географическая широта максимума воздействия ( $\varphi_0 = 60^\circ$ );  $d\varphi$  – коэффициент, характеризующий полуширину области воздействия ( $d\varphi = 20^\circ$ ).

$M_1$  и  $M_2$  – соответственно эффективные массы водяного пара и  $\text{CO}_2$ . В данной работе мы не учитываем изменения эффективной массы углекислого газа во время гелиогеофизических возмущений, так как они малы по сравнению с вариациями эффективной массы водяного пара, поэтому в наших расчетах считаем, что  $M_2 = \text{const}$  для каждого возмущения.

$A_0 = 1.716$ ,  $\beta_0 = 1.66$ ,  $\beta_1 = 0.409$  – параметры, полученные на основе экспериментальных данных [Мохов и Петухов, 1978].

Используя интегральную функцию пропускания, рассчитана интегральная функция поглощения длинноволновой уходящей радиации в атмосфере:

$$P(M_1) = 1 - D(M_1). \quad (2)$$

На основе рассматриваемой простой модели длинноволновой уходящей радиации рассчитан поток длинноволнового излучения для безоблачной атмосферы:

$$F(z_h) = \sigma T^4(z_0) D(M_1^*(z_h)) + \sigma \int_{z_0}^{z_h} T^4(z) \frac{dD(M_1^*(z_h) - M_1^*(z))}{dz} dz, \quad (3)$$

где:  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана–Больцмана;  $T$  – температура;  $z_0 = 925$  гПа;  $z_h = 300$  гПа.

Облачность играет важную роль в процессе переноса энергии в длинноволновой части спектра. При расчетах балла облачности мы следовали эмпирической формуле, приведенной в работе [Мохов и Петухов, 1978], но при этом учитывали влияние СА, в соответствии с механизмом, предложенным в работе [Жеребцов и др., 2005]. Поскольку, согласно данному механизму, гелиогеофизические возмущения влияют не только на кластерный состав, но и на фазовое состояние водяного пара, можно предложить линейную параметризацию влияния гелиогеофизических возмущений на облачность, используя в качестве “проху”  $PC$ -индекс:

$$n_e = 1.68(f - 0.5) \times (1 + \beta \lg|PC| \exp(-(\varphi - \varphi_0)^2/d\varphi^2)), \quad (4)$$

где:  $n_e$  – эффективный балл облачности. Следуя работе [Мохов и Петухов, 1978], мы предполагаем, что высота эффективного слоя облачности  $z_{cl} = z_h/2$ ;  $f$  – относительная влажность;  $\beta = 0.05$  – свободный параметр модели.

Поток уходящего длинноволнового излучения над облаками рассчитывался согласно формуле

$$F_{cl}(z_h) = \sigma T^4(z_{cl}) D(M_1^*(z_h) - M_1^*(z_{cl})) + \sigma \int_{z_{cl}}^{z_h} T^4(z) \frac{dD(M_1^*(z_h) - M_1^*(z))}{dz} dz. \quad (5)$$

Таким образом, поток уходящего длинноволнового излучения, с учетом облачности, можно представить следующим образом:

$$F(z_h) = F_0(z_h)(1 - n_e) + F_{cl}(z_h)n_e. \quad (6)$$

На основе данных реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996], которые представлены на сайте (<https://www.esrl.noaa.gov/psd>), рассчитаны

среднесуточные карты интегральной функции поглощения длинноволновой радиации, уходящего длинноволнового потока и карты аномалий температуры слоя тропосферы 925–700 гПа. В качестве нормы для расчета аномалий температуры использовался рекомендованный в климатологии период 1961–1990 гг. Для анализа связи интегральной функции поглощения длинноволновой радиации и уходящего потока длинноволнового излучения с температурой рассчитывались коэффициенты корреляции между радиационными характеристиками и температурой. Далее строились карты распределения полученных коэффициентов корреляции рассматриваемых параметров для периодов с различным уровнем активности.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

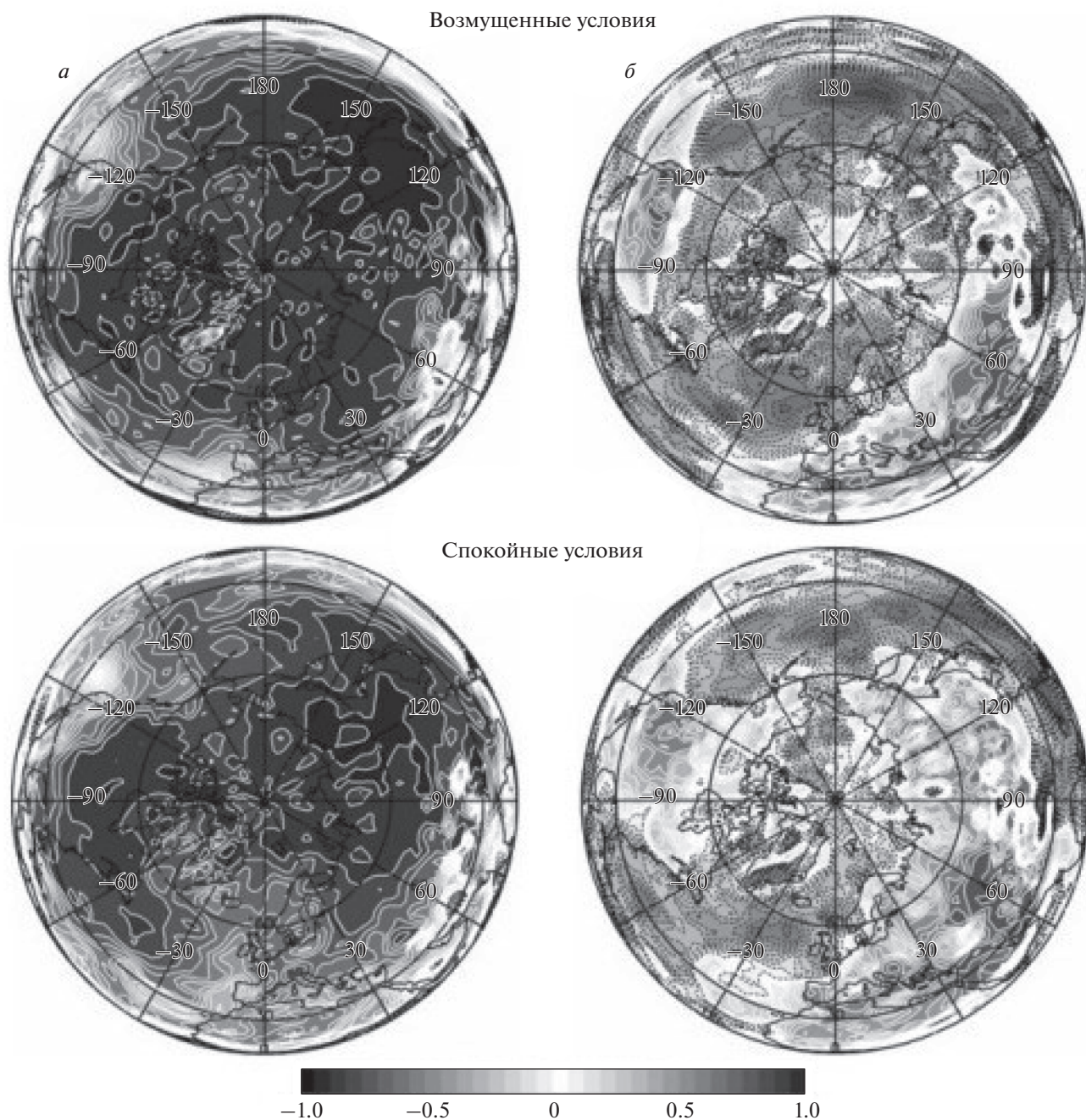
Основные характеристики 23-го цикла солнечной активности (СА) соответствуют характеристикам солнечных циклов средней величины. Развитие 23-го цикла полностью укладывается в схему хода эволюции ему подобных по темпу развития и высоте более ранних солнечных циклов, для которых числа Вольфа изменяются в пределах  $80 < W < 130$ . Фаза его минимума, начавшаяся в мае 2005 г., продлилась 4.5 года, захватив начало развития текущего 24-го цикла СА [Ishkov, 2010]. Поскольку 23-й солнечный цикл развивался по сценарию, типичному для нормальных циклов СА, был проведен анализ радиационных характеристик атмосферы в течение максимума (2000 г.) и минимума (2009 г.) 23-го цикла СА.

Сопоставление карт интегральной функции поглощения и температуры, рассчитанных для гелиогеофизических возмущений как в периоды повышенной СА (2000 г.), так и в периоды пониженной СА (2009 г.) показало, что пространственное распределение интегральной функции поглощения хорошо соответствует пространственной структуре аномалий температуры в обоих полушариях. Для анализа связи интегральной функции поглощения с аномалиями температуры нами построены карты коэффициентов корреляции между рассматриваемыми характеристиками для геомагнитных возмущений 2000 г., во время которых среднесуточные значения *PC*-индекса  $> 2.0$ , отдельно для каждого полушария (рис. 1а, рис. 2а). Результаты анализа рассчитанных карт показали, что вариации температуры хорошо коррелируют с вариациями интегральной функции поглощения, в возмущенные периоды, на средних и в высоких широтах, как в северном, так и в южном полушариях. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между интегральной функцией поглощения и аномалиями температу-

ры в спокойных геомагнитных условиях (2009 г., *PC*-индекс  $< 0.2$ ) представлено на рис. 1а, рис. 2а. Сравнительный анализ данных, приведенных на рис. 1а и рис. 2а, показал, что в возмущенные периоды вариации температуры более тесно связаны с изменениями интегральной функции поглощения, чем в спокойные периоды, что согласуется с механизмом влияния СА на тропосферу, предложенным в работе [Жеребцов и др., 2005].

Проведенный анализ пространственного распределения коэффициента корреляции между уходящим потоком длинноволнового излучения и аномалиями температуры показал, что во время возмущений поток антикоррелирует с температурой нижнего слоя тропосферы (рис. 1б). Полученная особенность лучше проявляется в южном полушарии, за исключением центральной части Антарктиды (рис. 2б). Данные, приведенные на рис. 1б, рис. 2б, показывают, что в условиях с низким уровнем геомагнитной активности поток длинноволнового излучения коррелирует с температурой над континентами и антикоррелирует над океанами, особенно в северном полушарии (рис. 1б). Следовательно, над континентами вклад температуры является преобладающим, по сравнению с наличием водяного пара в тропосфере, над океанами – наоборот. Следует отметить, что в спокойных геомагнитных условиях для северного полушария из-за того, что площадь, занятая материками, больше, чем поверхность океана, рассчитанный уходящий длинноволновый поток, осредненный по долготе, пропорционален температуре, что согласуется с результатами, представленными в работе [Будыко, 1974].

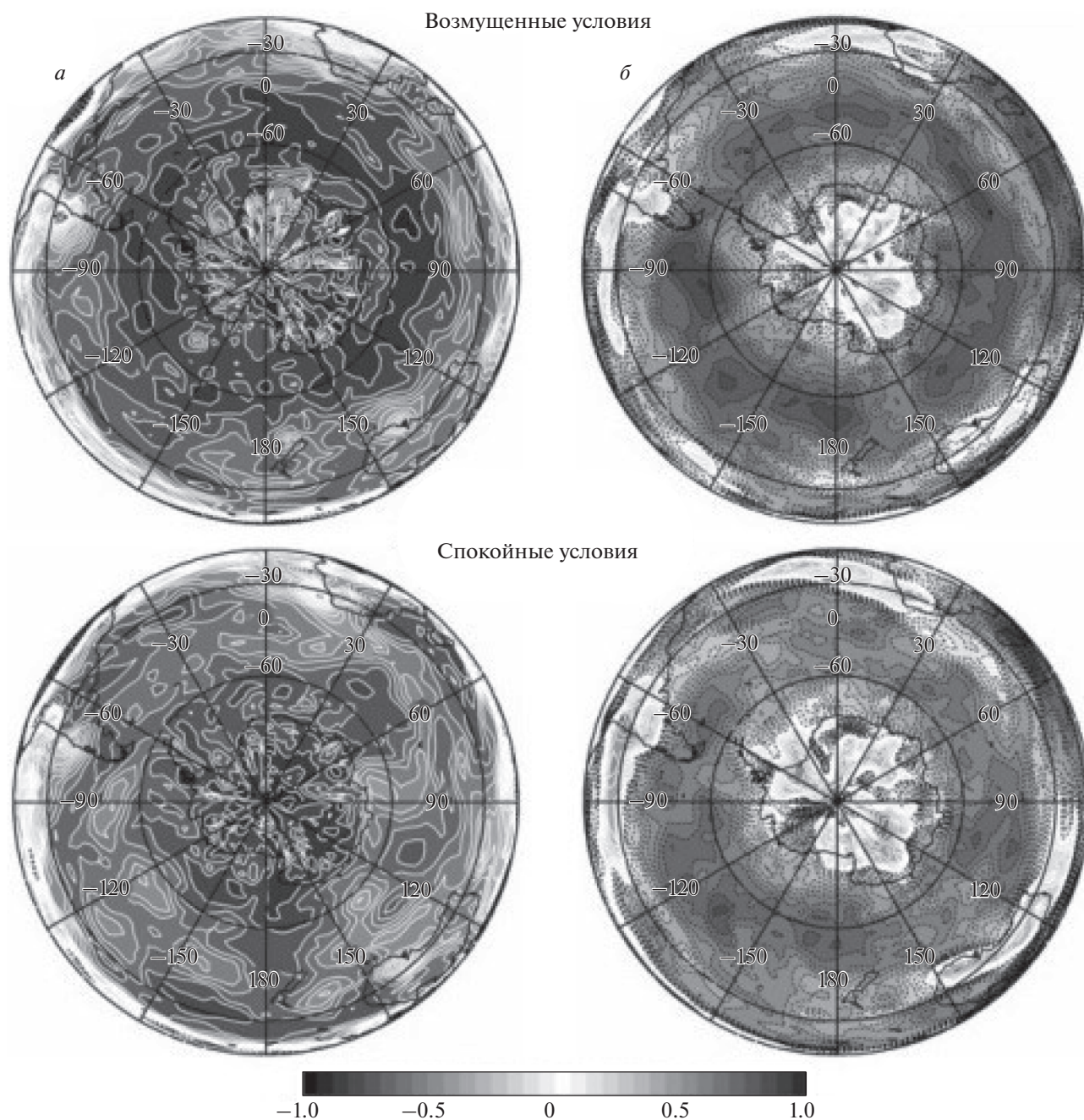
Для определения вклада СА, с помощью предложенной параметризации механизма влияния СА на тропосферу, были проведены расчеты уходящего длинноволнового потока для периода повышенной СА как с учетом предложенной параметризации, так и без него. Результаты корреляционного анализа связи рассчитанных потоков с температурой приведены на рис. 3. Сравнение карт распределения коэффициентов корреляции между уходящим длинноволновым потоком и температурой рассчитанных с учетом параметризации и без учета, показало, что учет параметризации приводит к увеличению площади областей, в которых уходящий поток длинноволнового излучения антикоррелирует с температурой. В северном полушарии на широтах выше  $60^\circ$  площади областей антикорреляции изменились с 40 до 80%, а в южном полушарии – с 40 до 50%. Величина коэффициента корреляции, для областей максимальной связи, возрастает в северном полушарии с  $0.5 \pm 0.09$  до  $0.8 \pm 0.05$ , а в южном – с  $0.7 \pm 0.06$  до  $0.8 \pm 0.05$ . При этом уменьшение



**Рис. 1.** Пространственное распределение коэффициентов корреляции между интегральной функцией поглощения длинноволновой радиации и температурой (*a*), уходящим потоком длинноволнового излучения и температурой (*б*) для северного полушария. Области корреляции – сплошная светлая линия, области антикорреляции – штриховая черная линия.

площади областей, в которых уходящий длинноволновый поток коррелирует с температурой, сопровождается понижением коэффициента корреляции. Отмеченная выше закономерность наблюдается как в северном, так и в южном полушариях. Таким образом, учет предложенной

параметризации влияния СА на тропосферу, при расчетах уходящего длинноволнового потока, приводит к усилению антикорреляции между уходящим потоком длинноволнового излучения и температурой слоя тропосферы 925–700 гПа примерно на 10%.



**Рис. 2.** Пространственное распределение коэффициентов корреляции между интегральной функцией поглощения длинноволновой радиации и температурой (*a*), уходящим потоком длинноволнового излучения и температурой (*б*) для южного полушария. Области корреляции – сплошная светлая линия, области антикорреляции – штриховая черная линия.

#### 4. ВЫВОДЫ

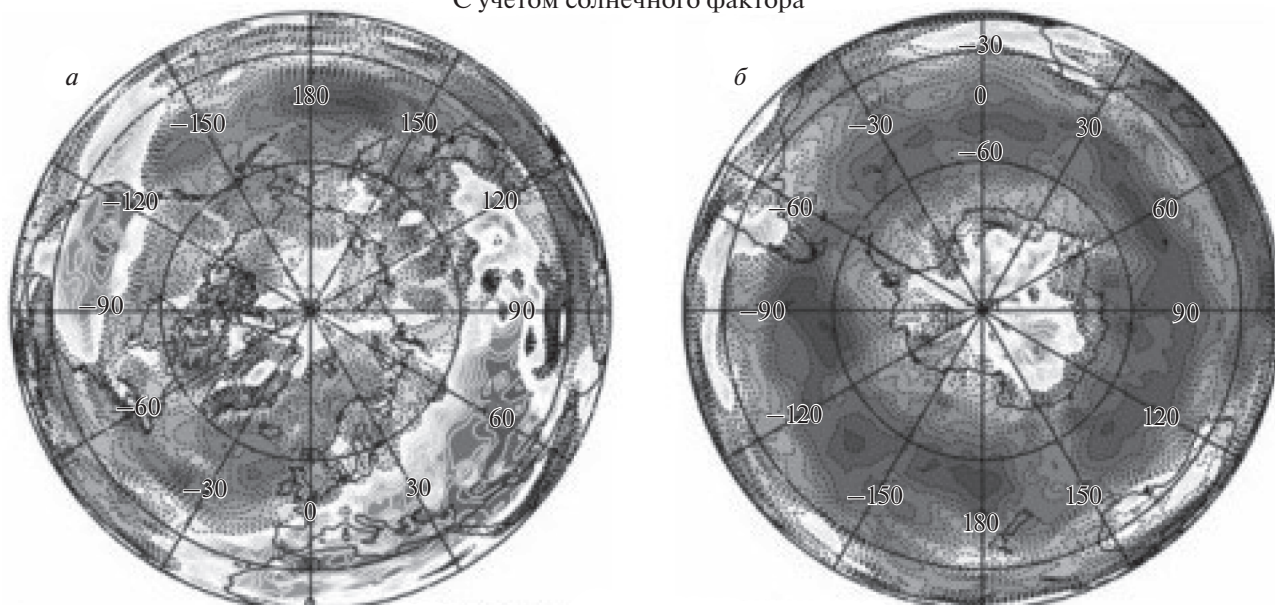
Результаты проведенного в данной работе исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Представлена параметризация физического механизма влияния СА на радиационный баланс климатической системы, в частности, на уходящий длинноволновой поток. С учетом предложенной параметризации проведены расчеты ин-

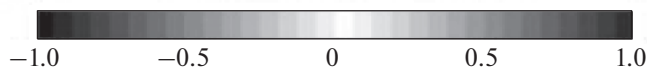
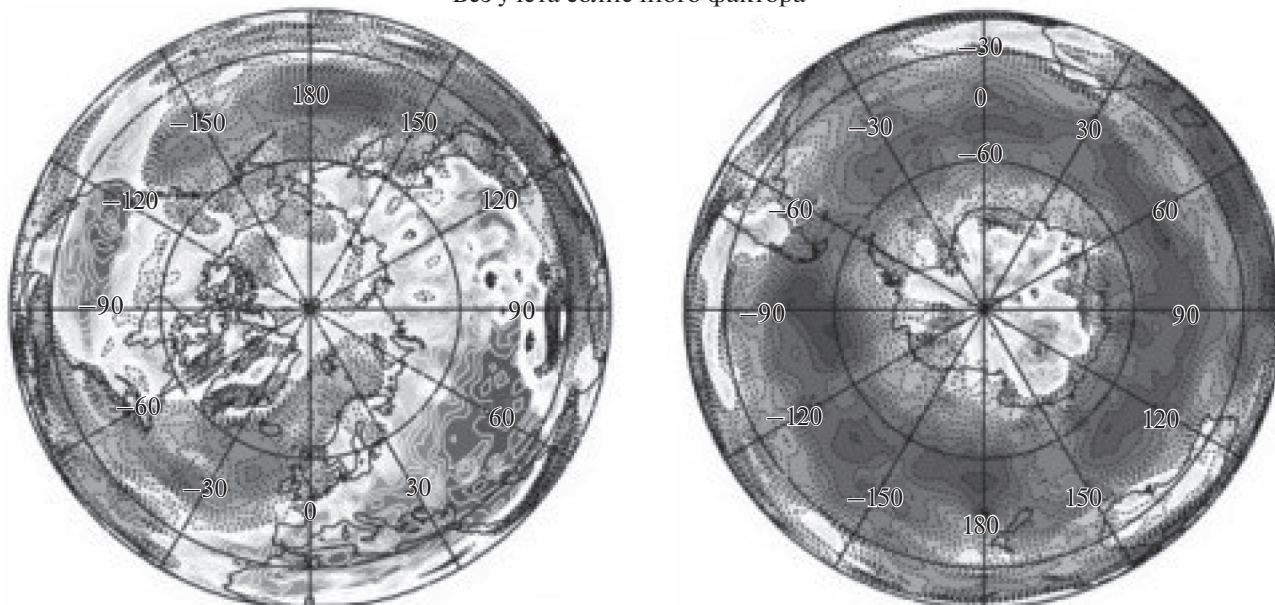
тегральной функции поглощения и уходящего длинноволнового потока для периодов повышенной и пониженной СА.

2. Анализ корреляционной связи интегральной функции поглощения длинноволновой радиации и уходящего потока длинноволнового излучения с температурой слоя тропосферы 925–700 гПа показал, что в периоды с повышенным

С учетом солнечного фактора



Без учета солнечного фактора



**Рис. 3.** Пространственное распределение коэффициентов корреляции между уходящим длинноволновым потоком и температурой: (а) – для северного полушария, б – для южного полушария во время гелиогеофизических возмущений. Области корреляции – сплошная светлая линия, области антикорреляции – штриховая черная линия.

уровнем активности корреляция между рассчитанными радиационными характеристиками и температурой существенно выше, чем в периоды с низким уровнем активности.

3. Во время гелиогеофизических возмущений учет параметризации приводит к увеличению корреляционной связи между уходящим длинноволновым потоком и температурой приблизительно на 10%. Следовательно, предложенная па-

раметризация может быть использована для учета влияния СА при расчетах уходящего длинноволнового потока на основе интегральной функции пропускания.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту за полезные замечания.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и при частичной поддержке Программы РАН “Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будыко М.И. Изменения климата / Л.: Гидрометеорологическое издательство, 280 с. 1974.
- Дубов Д.Ю., Востриков А.А. Сечение поглощения дальнего инфракрасного излучения кластеризованным водяным паром // Письма в ЖТФ. Т. 36. № 4. С. 54–60. 2010.
- 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. Т. 18. № 12. С. 1042–1050. 2005.
- Мохов И.И., Петухов В.К. Параметризация уходящей длинноволновой радиации для климатических моделей / Препринт. М.: ИФА РАН, 34 с. 1978.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Модельные оценки глобальных климатических изменений в XXI веке с учетом различных сценариев вариаций солнечной активности // ДАН. Т. 411. № 2. С. 250–254. 2006.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 32. № 5. С. 1–22. 1992.
- Розанов Е.В., Фроликс В.А. Оценка влияния температурной зависимости функции пропускания в ИК-диапазоне на чувствительность энергобалансовой климатической модели // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 29. № 4. С. 509–514. 1993.
- Dunne E.M., Gordon H., Kürten A. et al. Global atmospheric particle formation from CERN CLOUD measurements // Science. V. 354. № 6316. P. 1119–1124. 2016. <https://doi.org/10.1126/science.aaf2649>
- Ishkov V.N. Properties and surprises of solar activity XXIII cycle // Sun and Geosphere. V. 5. № 2. P. 43–46. 2010.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. V. 77. № 3. P. 437–470. 1996. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Karakhanyan A.A., Molodykh S.I. Spatial distribution of temperature during geomagnetic disturbances // Solar-Terrestrial Physics. V. 4. № 4. P. 59–62. 2018. <https://doi.org/10.12737/stp-44201808>
- Kniveton D.R., Tinsley B.A., Burns G.B., Bering E.A., Troshichev O.A. Variations in global cloud cover and the fair-weather vertical electric field // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. № 13. P. 1633–1642. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.07.001>
- Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F., Bazilevskaya G.A., Harrison R. G., Krivolutsky A.A., Nicoll K.A., Rozanov E.V., Turunen E., Usoskin I.G. Energetic particle influence on the Earth’s atmosphere // Space Sci. Rev. V. 194. № 1–4. P. 1–96. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4>
- Mokhov I.I. Russian climate studies in 2011–2014 // Izv. Atmos. Ocean Phy. V. 53. № 5. P. 550–563. 2017. <https://doi.org/10.1134/S0001433817050097>
- Mokhov I.I., Smirnov D.A., Karpenko A.A. Assessments of the relationship of changes of the global surface air temperature with different natural and anthropogenic factors based on observations // Dokl. Earth Sci. V. 443. № 1. P. 381–387. 2012. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12030178>
- Svensmark H., Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 59. № 11. P. 1225–1232. 1997. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(97\)00001-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00001-1)
- 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. V. 94. № 1–2. P. 231–258. 2000.
- Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrom S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index // Planet. Space Sci. V. 36. № 11. P. 1095–1102. 1988. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(88\)90063-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90063-3)
- Troshichev O.A., Janzhura A. Relationship between the PC and AL indices during repetitive bay-like magnetic disturbances in the auroral zone // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. № 12. P. 1340–1352. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.05.017>
- Wagner R., Yan C., Lehtipalo K. et al. The role of ions in new particle formation in the CLOUD chamber // Atmos. Chem. Phys. V. 17. № 24. P. 15181–15197. 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-15181-2017>