



УДК 551.58:551.590.21

Влияние солнечной активности на температуру тропосферы и поверхности океана

Г. А. Жеребцов (gzrb@iszf.irk.ru),
В. А. Коваленко (vak@iszf.irk.ru),
С. И. Молодых (sim@iszf.irk.ru),
К. Е. Кириченко (kirichenko@iszf.irk.ru)

Аннотация. Рассмотрено влияние солнечной активности на изменения температуры атмосферы и Мирового океана. Приведены и обсуждаются результаты анализа закономерностей и особенностей реакции тропосферы и температуры поверхности океана, как на отдельные гелиогеофизические возмущения, так и на долговременные изменения солнечной и геомагнитной активности. Представлены результаты анализа изменения температуры поверхности океана (ТПО), охватывающие временной период с 1854 по 2012 г., и их связь с вариациями солнечной активности. Получены новые доказательства влияния солнечной активности на климатические процессы в тропосфере и океане. Выявлен достоверный отклик в основных климатических характеристиках: приземной температуре воздуха (ПТВ) и температуре поверхности океана на воздействие солнечной активности. Установлено, что климатический отклик на воздействие солнечной и геомагнитной активности характеризуется значительной пространственно-временной неоднородностью и носит региональный характер. Выявлены закономерные изменения пространственной структуры отклика климатической системы на геомагнитную активность.

Ключевые слова: климат, океан, тропосфера, солнечная активность.

Введение

Несмотря на то что исследование проблемы влияния солнечной активности (СА) на погоду и климат имеет длительную историю [2; 5; 8; 22–24], тем не менее, до сих пор не получен ответ на вопрос о реальности и значимости количественного вклада солнечной активности в климатические изменения, особенно характерные для современной эпохи. В последнее десятилетие в научных кругах вновь резко возросла активность по определению количественного вклада СА в изменение глобального климата, поскольку наблюдаются признаки того, что глобальное потепление (ГП) в последнее десятилетие практически прекратилось. Поэтому крайне важно понять природу данного феномена, учитывая, что CO_2 в атмосфере в этот период продолжает возрастать, а солнечная и, соответственно, геомагнитная активности в последнее десятилетие заметно ослабли. На основе комплексного анализа данных наблюдений гидрометеоро-

рологических характеристик тропосферы и океана и полуэмпирических моделей получены оценки воздействия солнечной активности на климатические процессы [7; 19; 22; 23].

Главная особенность проблемы изменений глобального климата состоит в том, что, хотя факт его потепления в XX в. не вызывает сомнений (особенно это относится к последней четверти века), причины потепления и роль различных факторов в изменении глобального климата остаются во многом неясными. В еще большей степени это относится к прогнозам климата с учетом антропогенных воздействий. Одна из важных нерешенных проблем состоит в отсутствии достоверных количественных оценок вклада как антропогенных факторов, так и солнечной активности в формирование глобального климата. В современных представлениях о глобальном климате и причинах его изменений содержится много неопределенностей. Наибольшая из них связана с неадекватностью учета интерактивных процессов в системе «аэрозоль – облака – радиация», а также взаимодействий в системе «атмосфера – гидросфера – криосфера». Наблюдаемые корреляции долговременных изменений глобальной температуры (ГТ) и содержания CO_2 не означают, что причиной увеличения ГТ является возрастание концентрации CO_2 . Реально наблюдаемое увеличение температуры океана также приводит к увеличению содержания CO_2 в атмосфере, поэтому такое изменение может быть следствием, а не причиной ГП [13; 14].

В конце XIX в. началось потепление, которое, за исключением интервала 1940–1970 гг., продолжалось до 2000 г. Средняя глобальная температура повысилась за последние 100 лет на $0,7^\circ\text{C}$. Рост средней глобальной температуры воздуха в последние 100 лет не был монотонным. Это проявилось, например, в том, что потепление климата в XX в. происходило в течение двух периодов: 1910–1945 и 1977–2000 гг., а после 2000 г., как видно на рис. 1, потепление практически прекратилось. В то же время среднегодовая концентрация CO_2 (ppm) в XX и начале XXI в. непрерывно возрастает. Скорость роста CO_2 значительно увеличилась в 40-е гг. когда первое потепление закончилось и наблюдалось небольшое похолодание в Северном полушарии. Природа похолодания Северного полушария в период 1940–1970 гг. подробно рассматривалась нами в работах [5; 8]. Заметим, что в период первого потепления рост CO_2 был незначительным и не мог заметно повлиять на увеличение температуры атмосферы. В последние 10 лет рост глобальной температуры практически прекратился, в то время как содержания парниковых газов в атмосфере продолжает возрастать. Заметим, что скорость роста температуры была примерно одинаковой как для первого, так и второго периода потепления. Это позволяет сделать вывод, что в наблюдаемое потепление в XX в. вклад антропогенного фактора не был определяющим, а природа первого и второго потепления идентичны. Подчеркнем, что солнечная и геомагнитная активности в последнее десятилетие заметно ослабли (см. рис. 1).

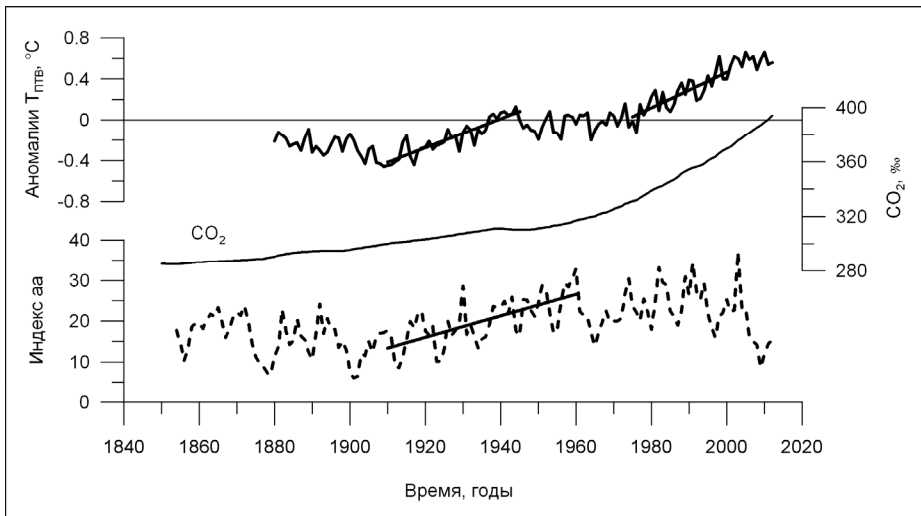


Рис. 1. Изменения глобальной приземной температуры воздуха, концентрации углекислого газа в атмосфере CO_2 и геомагнитной активности (индекса)

Роль океана и криосферы в изменении климата

Океан наравне с атмосферой участвует в межширотном и глобальном переносе тепла и вносит значительный вклад в наблюдаемые климатические изменения. Особенно важная роль принадлежит Атлантическому океану. В Северной Атлантике течение Гольфстрим, огибающее западное побережье Северной Америки, переносит теплые тропические воды в северные районы океана. В Лабрадорском море и у берегов Гренландии и Норвегии эти воды охлаждаются, становясь более плотными, они опускаются на глубину. Этот процесс имеет важнейшее значение для формирования климата, так как глубинные воды формируются в этих регионах и именно они составляют движущую силу термохалинной циркуляции, а, следовательно, влияют на перенос тепла в океане.

Потепление Арктики в начале XX в. характеризовалось значительной пространственно-временной и сезонной неоднородностью [1]. Максимальные среднегодовые ПТВ в Арктике наблюдались в конце 30-х гг. Однако в период с конца 1950-х до середины 1960-х гг. отмечались необычно высокие температуры воздуха летом в районе Западной Гренландии, моря Баффина и прилегающей части Канадского архипелага. Это сопровождалось усилением таяния снега и льда, увеличением стока с окружающих материков, изменениями в атмосферной циркуляции над океаном. Средняя многолетняя температура воздуха в этой области летом наиболее низкая во всей Арктике, и здесь скапливается наибольшее количество снега и льда в зимний период. Большие положительные аномалии температуры воздуха в период с конца 1950-х до середины 1960-х гг. способствовали интенсивному летнему таянию и стоку пресной воды в Арктический бассейн, Канад-

ские проливы, море Баффина и Гудзонов залив. Это привело к тому, что в конце 60-х гг. из-за выноса аномально большого количества льда из Арктического бассейна к востоку от Гренландии и его последующего таяния в верхнем 200-метровом слое соленость уменьшилась. Это явление получило название «Великая соленостная аномалия» (ВСА). Наличие слоя распресненной, а значит и более легкой воды на поверхности в районах формирования глубинных вод привело к постепенному ослаблению, а затем и прекращению глубокой зимней вертикальной конвекции в море Лабрадор. В этот период произошли значительные изменения циркуляции вод в Северной Атлантике. Регион образования глубинных вод сместился к югу до широты примерно 50° . Поверхностный перенос тепла в океане существенно замедлился, так как в Гренландском, Исландском и Норвежском морях глубинная конвекция ослабла. На промежуточной глубине (300–800 м) на широтах к югу от 50° накапливались теплые воды. В этот период происходит аномальное возрастание теплосодержания в Атлантическом океане именно на глубинах 500–700 м [4], которое обусловлено значительным изменением циркуляции не только поверхностных, но и глубинных вод в Северной Атлантике. ВСА имела и другие последствия. Поскольку меридиональный поверхностный обмен вод через субполярный фронт в Северной Атлантике ослаб, уменьшилось поступление тепла и его отдача в атмосферу в высоких широтах. В этот период наблюдаются аномально низкие температуры как поверхности океана в Северной Атлантике [10], так и температуры воздуха в Арктике, увеличение площади морского льда в Арктическом бассейне в теплый сезон.

Таким образом, наряду с положительной обратной связью «потепление – уменьшение ледовитости – повышение температуры воздуха», действовавшей в 1920–1940 гг., в 1940–1975 гг. добавилась отрицательная обратная связь: «потепление – распреснение верхнего слоя – замедление термохалинной циркуляции поверхностных вод в океане – уменьшение потока тепла из океана в атмосферу – понижение температуры воздуха – увеличение протяженности морского льда», которая ответственна за изменение теплосодержания Атлантического и Мирового океанов в 1970–1980 гг.

В период второй фазы глобального потепления (1980–2000 гг.) также наблюдалось уменьшение площади морского льда во все сезоны, наиболее значительное в Тихоокеанском регионе в теплый период (рис. 2). Уменьшение площади морского льда усиливает воздействие потепления за счет положительной обратной связи «потепление – уменьшение ледовитости – уменьшение альбедо – повышение температуры воздуха». Именно в этот период наблюдается аномальное увеличение ПТВ, особенно значительное в полярных областях Северного полушария.

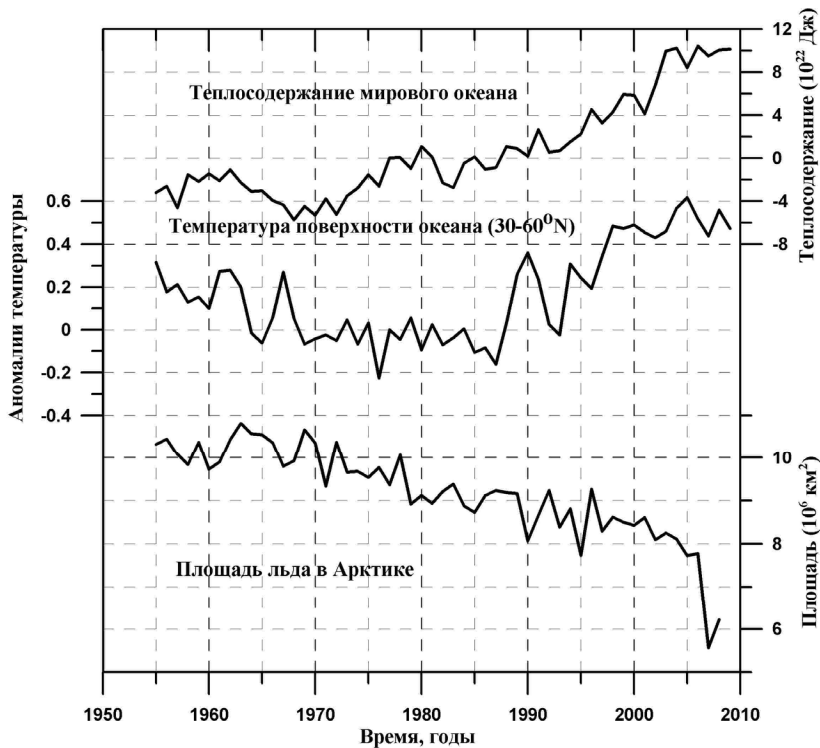


Рис. 2. Изменения площади льда в Арктике и аномалий ТПО на широтах 30–60° Северного полушария и теплосодержания Мирового океана

Таким образом, как первое (1910–1940 гг.), так и второе (1980–2000 гг.) потепление в XX в. соответствуют положительной фазе Северного Атлантического колебания, которое способствовало интенсификации межширотного переноса тепла в атмосфере и океане за счет интенсивного энергообмена, связанного с ветровым напряжением у поверхности океана, особенно в Северной Атлантике [1; 10]. Кроме того, в эти периоды наблюдается значительное уменьшение площади морского льда в Арктическом бассейне и, соответственно, включение положительной обратной связи. Следует подчеркнуть, что эффективность положительной обратной связи между температурой и площадью льда значительно больше во второй период потепления, так как толщина льда была в полтора раза меньше, чем в первый период [17].

Солнечная активность и климат

В серии работ [2; 5; 8; 11; 18–24] солнечная переменность рассматривается в качестве возможной причины глобального потепления. Одним из ключевых параметров, определяющих изменение глобального климата, является радиационный баланс на верхней границе атмосферы для всей

земной поверхности, который характеризует обмен энергией между земной климатической системой и космосом. Поток коротковолновой радиации, падающий на верхнюю границу атмосферы, достаточно хорошо известен – это солнечная постоянная (СП). По измерениям на космических аппаратах за два последних цикла солнечной активности (1980–2009 гг.) СП изменяется не более чем на 0,10 % [16].

Изменение глобального климата связано с изменением теплосодержания земной климатической системы, подавляющая часть которого определяется океаном. Радиационный баланс Земли характеризуется тем, что на низких широтах поглощенная земной системой солнечная радиация превосходит потери за счет излучения (рис. 3). В высоких широтах имеет место обратная картина – здесь потери тепла превосходят количество поглощенной солнечной радиации. Наблюдаемое климатическое распределение температуры на Земле поддерживается за счет межширотного переноса энергии. Эту климатическую функцию выполняют системы циркуляции в атмосфере и Мировом океане. В связи с этим система оказывается чувствительной к изменениям потерь тепла в высокоширотных областях и соответствующим изменениям меридионального градиента температуры и оттока тепла от низкоширотных областей. Следовательно, изменения потерь в высокоширотных областях могут заметно влиять на теплосодержание земной климатической системы и климат. Эти особенности функционирования климатической системы являются одним из основных элементов модели влияния солнечной активности на погоду и климат Земли [12; 24].

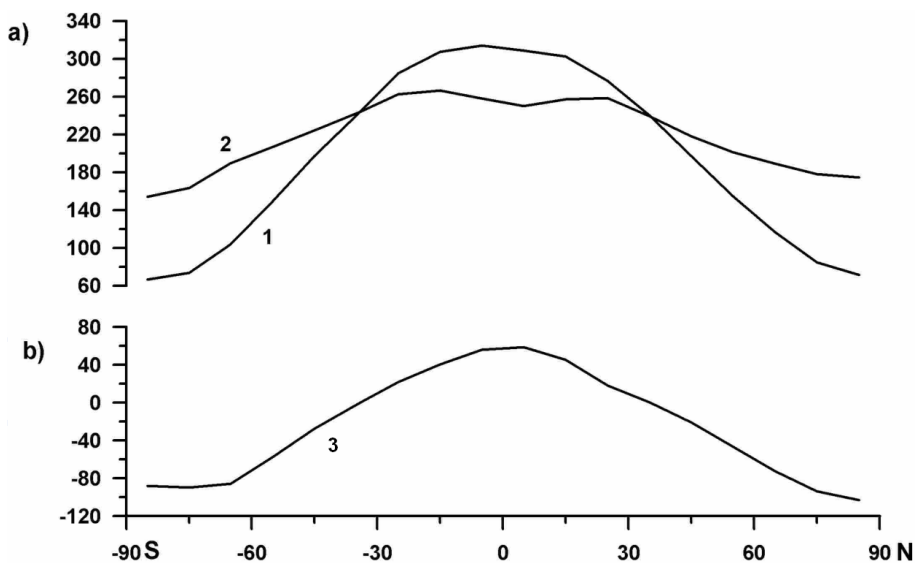


Рис. 3. Широтный ход на верхней границе атмосферы среднегодовых значений: 1 – полного потока коротковолновой радиации, 2 – потока длинноволновой радиации, 3 – радиационного баланса

Чувствительность земной климатической системы к изменениям солнечной постоянной

Тепловой баланс поверхности Земли

$$L_0 = \delta \sigma T_e^4, \quad (1)$$

где $L_0 = 239,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ – радиационная энергия, поглощенная подстилающей поверхностью Земли; δ – коэффициент черноты поверхности; σ – постоянная Стефана – Больцмана; $T_e = 258 \text{ К}$ – эффективная температура излучения поверхности.

Дифференцируя (1), получим

$$dL_0 = 4\delta\sigma T_e^3 dT_e. \quad (2)$$

Разделив (2) на (1), получим связь относительных изменений этих величин:

$$dT_e = T_e \cdot dL_0 / (4L_0).$$

Величина $T_e / 4L_0 = \beta$ – чувствительность температуры T_e земной поверхности без атмосферы к изменениям солнечной радиации $dT_e = \beta dL_0$, $\beta = 0,27 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Если СП изменится на 1 %, т. е. $dL_0 = 2,4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, то $dT_e = 0,65 \text{ К}$. Наличие атмосферы увеличивает равновесную температуру поверхности, поэтому Межправительственный комитет по изменению климата рекомендует $\beta_0 = 0,625 \text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ [19]. Таким образом, изменения СП на 1 % соответствуют изменению глобальной ПТВ на 1 К.

По другим оценкам, основанным на наблюдаемых разностях температур и инсоляций между экватором и полюсом, изменение солнечной постоянной на 1 % приводит к изменению температуры воздуха примерно на $0,6 \text{ }^\circ\text{С}$ [13]. Таким образом, вышеприведенные оценки позволяют сделать вывод о том, что непосредственно связанная с солнечной активностью изменяющаяся часть потока энергии, падающего на верхнюю границу атмосферы Земли, не может обеспечить наблюдаемое изменение энергетики земной климатической системы. Расчеты, проведенные в рамках глобальных климатических моделей [3; 15], также показывают, что изменения солнечной постоянной не могут внести значимый вклад в наблюдаемые вариации глобальной температуры. К сожалению, практически во всех работах, посвященных модельным оценкам вклада СА в изменения приземной температуры воздуха, так же как и сопоставлению данных наблюдений погодно-климатических характеристик с СА, используются только изменения СП.

Поскольку наблюдаемый отклик оказывается много больше, чем следует из оценки прямого воздействия изменения СП на климат, предполагают существование трудно реализуемых нелинейных обратных связей. В то же время в рамках эмпирических моделей [20; 21] оценка вклада солнечной активности в наблюдаемые изменения глобальной температуры воздуха в XX в. составляет 60–70 %.

Совершенно очевидно, что если влияние солнечной активности на климатические характеристики тропосферы является значимым, а изменения потока энергии, достигающего нижней тропосферы, за счет вариаций солнечной активности малы по сравнению с запасом энергии в стратосфере

и тропосфере, то физический механизм связи может реализоваться через изменение параметров, управляющих балансом потоков энергии, поступающих в земную атмосферу и уходящих в космос.

Модель влияния солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы

В работах [12; 24] была предложена физическая модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли. Блок-схема модели приведена на рис. 4. Ключевая концепция модели – влияние гелиогеофизических возмущений на параметры земной климатической системы, управляющие потоком длинноволнового излучения, уходящего от Земли в космос в высокоширотных областях. Величина энергии, необходимая для регулирования этого потока, может быть достаточно малой и не имеет принципиального значения. Изменение радиационного баланса высокоширотных областей приводит к перестройке термобарического поля тропосферы, изменениям меридионального градиента температуры, который определяет меридиональный перенос тепла. Вследствие этого изменяется теплосодержание земной климатической системы и глобальный климат.



Рис. 4. Блок-схема модели воздействия солнечной активности на климатическую систему Земли

Анализ пространственно-временного распределения отклика термобарических характеристик тропосферы на изолированные гелиогеофизические возмущения

На основе архива данных NCEP/NCAR Reanalysis был проведен анализ отклика тропосферы на воздействие отдельных гелиогеофизических возмущений [9]. Для каждого события построены ежедневные карты аномалий средней температуры слоя тропосферы (925–450 гПа) для Северного полушария [7]. На основе этих карт был проведен анализ изменений поля давления и температуры для стандартных уровней высокоширотной тропосферы в период аномальных гелиогеофизических возмущений (ГГВ). Оказалось, что после ГГВ в тропосфере наблюдается изменение типичного зонального переноса, которое проявляется в том, что возникает «стабилизация» отдельных движущихся структур. Кроме того, оказалось, что именно эти области являются областями максимального отклика тропосферы на ГГВ.

В качестве примера на рис. 5 представлены характеристики одного из типичных событий. В качестве реперной даты (0-день) выбран день прихода аномально большого потока солнечных космических лучей, который наблюдался 31.01.1982. В этот период также наблюдалась умеренная геомагнитная буря. Это можно видеть по данным индексов геомагнитной активности Ae и Dst, которые приведены на рис. 5.

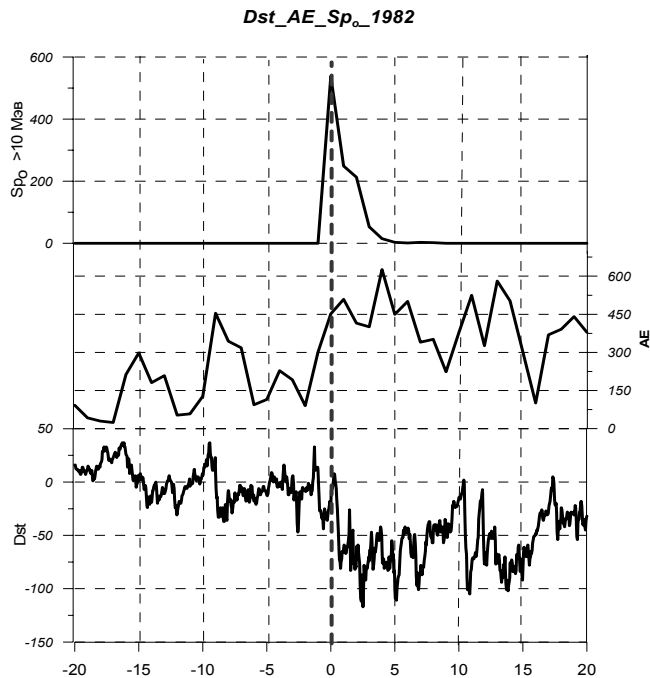


Рис. 5. Изменения интенсивности солнечных космических лучей и геомагнитной активности в январе–феврале 1982 г. 0-день соответствует 31.01.1982

Этот случай соответствует суммарному воздействию двух составляющих гелиогеофизической возмущенности, которые оказывают влияние на электрическое поле высокоширотной тропосферы – потока солнечных космических лучей и магнитосферной конвекции. Различие отклика на эти события заключается лишь в локализации областей максимального проявления. Для СКЛ область максимального проявления – район геомагнитного полюса, в то время как для геомагнитных бурь – это область аврорального овала.

Последовательные изменения высотного профиля отклонений температуры воздуха от дня предшествующего началу ГВ (-1 день) на стандартных изобарических уровнях в области «стационарирования» в период с 31 января по 06 февраля 1982 г. над сушей и океаном, приведены на рис. 6. По данным, приведенным на рис. 6, а, можно видеть, что в первый же день после ГВ начинается некоторое возрастание температуры воздуха от поверхности Земли до уровня 300 гПа, которое достигает максимальной величины на 3-й день (до 15°), в то время как выше уровня 300 гПа наблюдается понижение температуры. Максимальный рост температуры воздуха в области стационарирования наблюдается на 4-й день в слое 500–700 гПа.

Значительное влияние на особенности проявления в конкретных областях оказывает подстилающая поверхность. Наблюдается существенное различие отклика над сушей и океаном, прежде всего в изменении температуры вблизи подстилающей поверхности: над океаном возрастание температуры практически не заметно, в то время как над сушей температура возрастает, значительно превышая средний уровень.

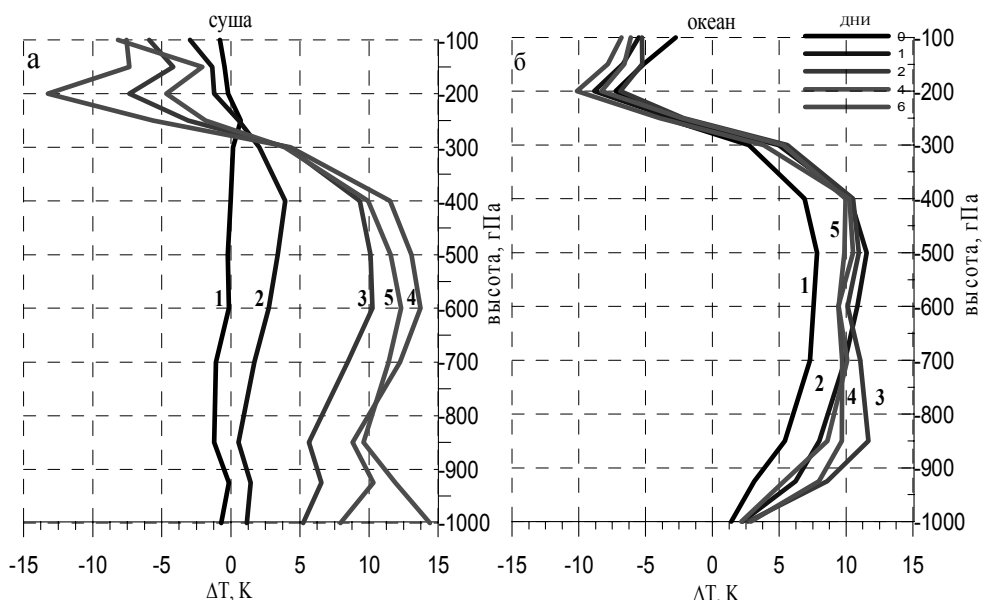


Рис. 6. Отклонения вертикального профиля температуры воздуха в Северном полушарии над сушей (а) и океаном (б) в период с 31.01 по 05.02.1982 от дня предшествующего началу ГВ в областях «стационарирования»

Это различие обусловлено тем, что баланс энергии высокоширотных областей в холодный период времени в значительной степени обеспечивается меридиональным потоком тепла (притоком тепла от низкоширотных областей). В период воздействия ГГВ, в областях проявления, вследствие облакообразования в верхней тропосфере, уменьшается радиационное выхолаживание, изменяется радиационный баланс, при этом возрастает температура средней и нижней тропосферы и возрастает поток тепла к Земле, который и определяет увеличение приземной температуры воздуха. Значительное различие теплоемкости океана и суши приводит к тому, что приземная температура воздуха над океаном изменяется незначительно (рис. 6, б), а на высотах 800–400 гПа температура тропосферы увеличивается на 10° . Увеличение температуры нижней и средней тропосферы приводит к перестройке термобарического поля, уменьшению среднего меридионального градиента температуры между полярными и экваториальными областями, который определяет меридиональный перенос тепла. Это отчетливо видно по данным, приведенным на рис. 7.

В областях долгот $0-60^{\circ}$ и особенно $180-240^{\circ}$ (Атлантический и Тихоокеанский сектор) разность температур между широтами $40-70^{\circ}$ на уровне 500 гПа до ГГВ составляла $15-20^{\circ}$, на 4-й день, после ГГВ, эта разность уменьшилась до 5° . Это сопровождается уменьшением оттока тепла из низкоширотных областей, что приведет к увеличению температуры тропосферы на средних и низких широтах, увеличению теплосодержания океана и климатической системы в целом. Следует подчеркнуть, что первичная реакция в соответствии с рассмотренным механизмом – фазовый переход водяного пара, выделение скрытого тепла приводят лишь к незначительному увеличению температуры в областях формирования облачности. Наиболее важным и принципиальным в предложенной модели является последующее изменение циркуляции и радиационного баланса.

Таким образом, наблюдаемые закономерности изменений циркуляции в полярных широтах полностью соответствуют ожидаемым в рамках рассматриваемой модели воздействия ГГВ на термобарическое поле тропосферы.

Проявление солнечной активности в температуре поверхности океана

Океаны играют важную роль в климатической системе, так как являются аккумулятором солнечной радиации и активно участвуют в глобальном перераспределении тепла между тропическими и полярными районами. Обладая огромной теплоемкостью, океаны оказывают стабилизирующее влияние на атмосферу. Тепловые потоки через поверхность океана и их временная изменчивость являются определяющим фактором в процессе крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы.

В соответствии с основными положениями модели влияния солнечной активности на тропосферу, предлагаемыми авторами [12; 19], был проведен анализ связи долговременных изменений ТПО и геомагнитной активности на основе данных наблюдений. Оказалось, что глобальная ТПО коррелирует с геомагнитной активностью (рис. 8).

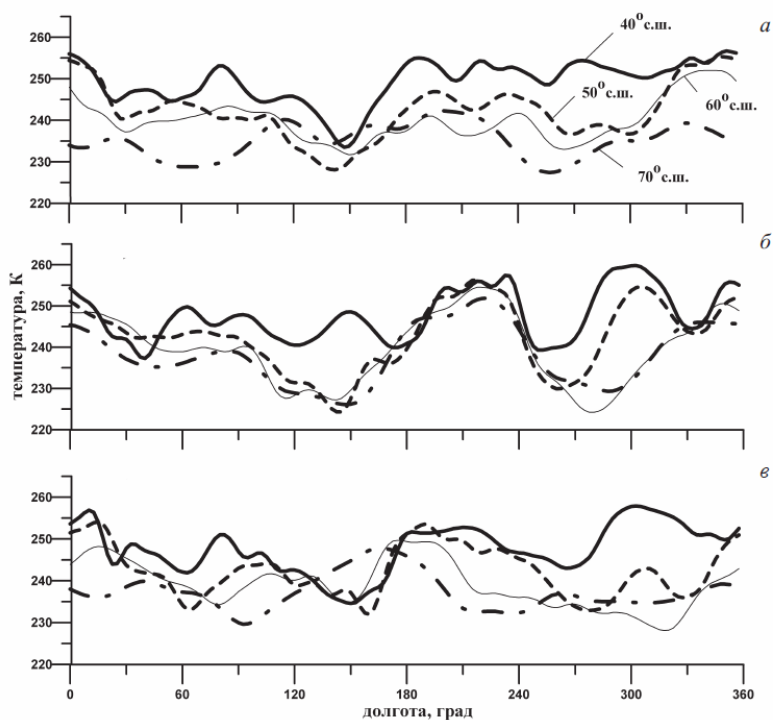


Рис. 7. Зональное распределение температуры воздуха на поверхности 500 гПа: а) в день предшествующий ГГВ 30.01.1982, б) на четвертый день после ГГВ 04.02.1982, в) на десятый день после ГГВ 10.02.1982

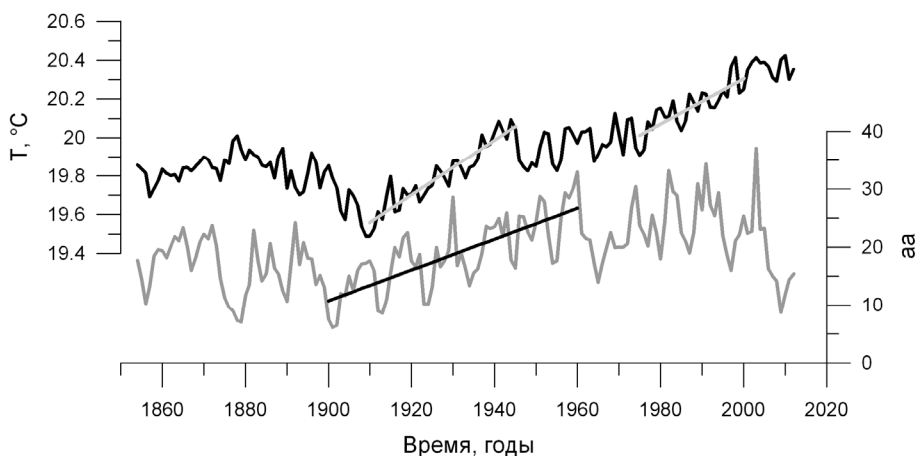


Рис. 8. Среднегодовые значения температуры поверхности океана в зоне 60° N–60° S; 0–360° и индекса геомагнитной активности *aa*

В таблице представлены и систематизированы результаты анализа связи между геомагнитной активностью и температурой поверхности океана для различных регионов и различных периодов сглаживания.

Таблица

Значения коэффициента корреляции между ТПО и *aa*-индексом для периода 1868–2011 гг.

Географические области	Средне-годовые	Сглаженные по 5 годам	Сглаженные по 11 годам
Глобальная (60° N–60° S; 0–360°)	0,43	0,62	0,77
Северное полушарие (0°–60° N; 0–360°)	0,38	0,57	0,77
Южное полушарие (0°–60° S; 0–360°)	0,43	0,62	0,75
Индийский океан (30–50° S; 35–110° E)	0,52	0,72	0,83
Тихий океан (10–30° N; 140–160° W)	0,37	0,58	0,78
Атлантический океан (20–40° N; 60–70° W)	0,44	0,63	0,77

Региональность климатического отклика при глобальном воздействии долговременных вариаций солнечной активности обусловлена влиянием циркуляционных процессов в поверхностном слое океана и атмосферы. Это полностью подтверждает предлагаемые авторами положения модели влияния солнечной активности на погодно-климатические характеристики [7; 12; 24]. Степень связи изменений ТПО с вариациями геомагнитной активности существенно зависит от временного масштаба. При увеличении периода сглаживания от одного года до 11 лет коэффициент корреляции значительно возрастает как для глобальной ТПО, так и для температуры в отдельных областях от 0,45 до 0,90. Наблюдаемая зависимость от временного масштаба обусловлена тем, что большая часть вариаций с временным масштабом меньше пяти лет обусловлена процессами, не связанными с геомагнитной активностью (квазидвухлетние вариации, Эль-Ниньо, Ла-Ниньо, вулканы).

На рис. 9 представлены карты пространственного распределения коэффициента корреляции между ТПО и *aa*-индексом геомагнитной активности для четырех периодов на разных фазах квазিশестидесятилетней вариации.

Очевидно, что климатический отклик в ТПО на воздействие солнечной и геомагнитной активности характеризуется значительной пространственно-временной неоднородностью и носит региональный характер. Характерной особенностью этих распределений является наличие областей как положительной, так и отрицательной корреляции. Исключением является эпоха (1910–1940 гг.), в которую отклик на геомагнитную активность в ТПО был положительным практически во всех регионах, т. е. носил глобальный характер. Эта эпоха соответствует наиболее длительному периоду возрастания геомагнитной активности в рассмотренный период, в конце которого среднегодовые минимальные значения геомагнитной активности превысили максимальные в начале эпохи (см. рис. 8).

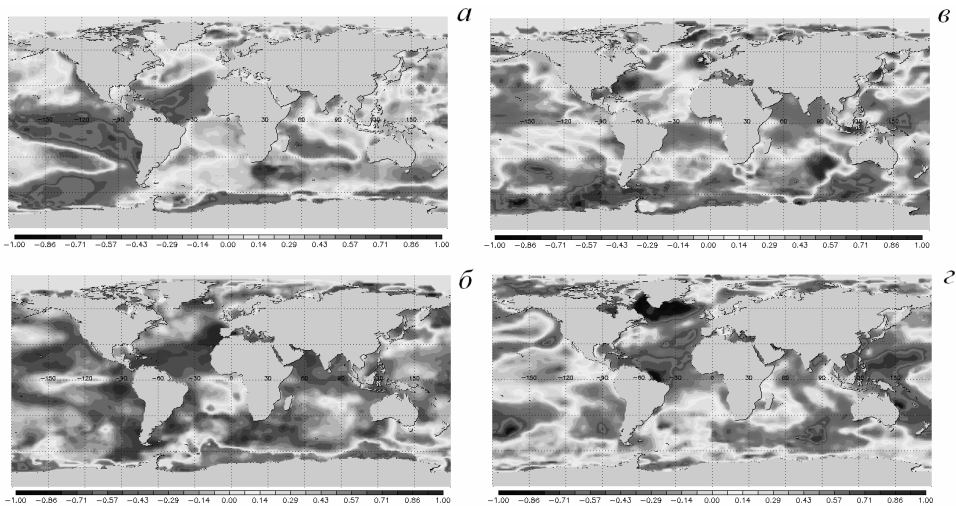


Рис. 9. Карты корреляций между сглаженными значениями ТПО и *aa*-индекса геомагнитной активности в течение 1868–2000 гг. для различных климатических эпох: 1868–1910 (а); 1910–1948 (б); 1948–1976 (в); 1976–2000 (г)

Кроме того, выявлены регионы, в которых во все эпохи знак связи между ТПО и *aa* остается положительным. В качестве примера на рис. 10 приведены данные по ТПО и геомагнитной активности для трех регионов.

Возможный вклад солнечной активности в изменения теплосодержания земной климатической системы

Оценим эффективность механизма воздействия солнечной активности в изменении энергосодержания земной климатической системы. Будем полагать, что механизм включился с началом роста гелиогеофизической возмущенности, соответствующей началу прошлого столетия. Для этого рассмотрим возможные изменения энергетического баланса земной климатической системы за счет местной зимы полярных широт.

Изменение радиационного выхолаживания (изменение полных радиационных потерь) для высокоширотных областей местной зимой, при возрастании уровня геомагнитной возмущенности можно представить следующим образом:

$$\Delta Q = (B_0 - B_1)SK_1K_2, \quad (1)$$

где Q – общее изменение радиационных потерь; B_0 и B_1 – энергетические потери системы в отсутствии и при наличии облачности; S – эффективная площадь, над которой реализуется механизм; $K_1 = 0,3$ – коэффициент, отражающий вероятность присутствия внешнего воздействия (периоды повышенной геомагнитной активности и прихода СКЛ); $K_2 = 0,3$ – коэффициент, отражающий вероятность того, что условия в атмосфере «благоприятны» для проявления механизма, эффективность которого зависит от циркуляционной эпохи.

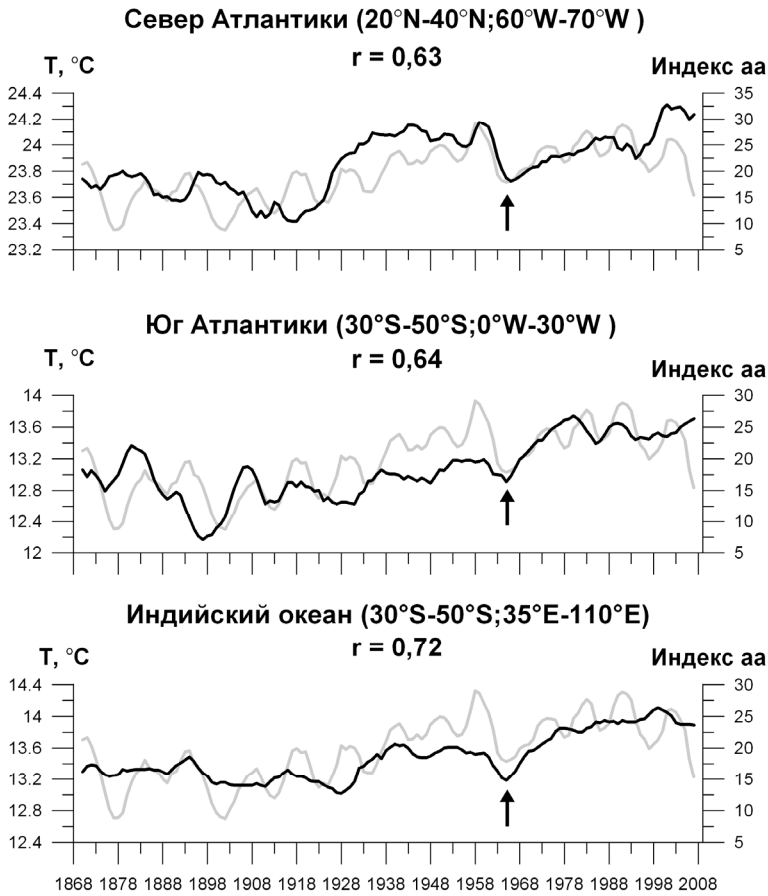


Рис. 10. Среднегодовые сглаженные по пяти годам значения ТПО в различных регионах, геомагнитная активность (aa-индекс) и коэффициенты корреляции

$$S = 4\pi R_E^2 (1 - \sin \varphi) K_3, \quad (2)$$

где R_E – радиус Земли, φ – широта; $K_3 = 0,3$ – коэффициент, отражающий долю площади по долготе, чувствительную к внешним воздействиям.

Согласно данным актинометрического радиозондирования в Антарктиде эффективное излучение на уровне тропопаузы при облачных условиях составляет 60–70 % от таких же величин при ясном небе, и $(B_0 - B_1)$ составляет величину 45–65 Вт/м². В соответствии с этим оценка изменений интегральной мощности потерь на излучение земной климатической системой только в полярных областях, при переходе от периодов низкой геомагнитной активности к высокой, за счет рассмотренного механизма составляет величину $(1-2) \cdot 10^{14}$ Вт и соответствует скорости потепления $(0,2-0,4)$ Вт/м² для всей земной поверхности. Указанная величина есть оценка возможного «энергосберегающего ресурса» за счет солнечной пе-

ременности. Много это или мало и могут ли эти изменения заметно повлиять на земной климат.

Сравним полученные оценки с наблюдаемыми изменениями теплосодержания земной климатической системы за период глобального потепления во второй половине XX в.

В работах [20; 21] приведены данные об изменении теплосодержания земной климатической системы между 1955 и 2005 гг., при этом учтено увеличение теплосодержания Мирового океана – $18,2 \cdot 10^{22}$ Дж; возрастание теплосодержания, обусловленное фазовым переходом льда, снега (Антарктика, на суше, Арктика) – $1,25 \cdot 10^{22}$ Дж и увеличение теплосодержания атмосферы – $0,66 \cdot 10^{22}$ Дж. Полное увеличение теплосодержания за 50 лет (Q_{Σ}) составляет $2 \cdot 10^{23}$ Дж. Предполагая, что эти изменения происходили равномерно за рассматриваемый интервал времени, скорость изменения теплосодержания или мощность источника, который обеспечивал изменения теплосодержания:

$$W = Q_{\Sigma} / t = 2 \cdot 10^{23} / (1,6 \cdot 10^9) = 1,3 \cdot 10^{14} \text{ Вт},$$

что соответствует дополнительному потоку энергии $0,3 \text{ Вт/м}^2$ для всей поверхности Земли.

Подчеркнем, что за рассматриваемый промежуток времени наблюдались лишь квазипериодические вариации солнечной постоянной, а значимый тренд отсутствует. Это позволяет сделать вывод, что наблюдаемые изменения теплосодержания земной климатической системы вполне могут быть обусловлены уменьшением потока энергии, излучаемого земной системой в космос. Таким образом, в рамках рассмотренного электрооптического механизма оценка вклада солнечной переменности в изменение энергосодержания земной климатической системы показывает, что изменения, обусловленные солнечной переменностью, сравнимы с изменениями, наблюдаемыми в XX в.

Есть основания считать, что глобальное потепление в настоящее время практически закончилось и следует ожидать медленного понижения ПТВ в период 2014–2040 гг., в первую очередь в Северном полушарии над сушей.

Список литературы

1. Алексеев Г. В. Изменение климата Арктики в XX столетии / Г. В. Алексеев // Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий. – М. : Наука, 2006. – 408 с.
2. Влияние гелиогеофизических возмущений полярной тропосферы на климатическую систему Земли / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых, О. А. Рубцова // Метеорол. и геофиз. исслед. – М. : Paulsen, 2011. – С. 251–268.
3. Дымников В. П. Чувствительность климатической системы к малым внешним воздействиям / В. П. Дымников, Е. М. Володин, В. Я. Галин // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 4. – С. 77–92.

4. Жеребцов Г. А. Влияние солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко // Солнечно-земная физика. – 2012. – Вып. 21. – С. 98–106.
5. Жеребцов Г. А. Основные физические процессы в атмосфере Земли, криосфере и океане, определяющие особенности климатических изменений в XX в. и их связь с солнечной активностью / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых // Солнечно-земная физика. – 2011. – Вып. 18. – С. 40–50.
6. Жеребцов Г. А. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – № 12. – С. 1003–1017.
7. Жеребцов Г. А. Роль солнечной и геомагнитной активности в изменении климата Земли / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – № 1. – С. 53–59.
8. Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых, О. А. Рубцова // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 87–108.
9. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин / И. Е. Фролов, З. М. Гудкович, В. П. Карклин, В. М. Смоляницкий // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2010. – № 2. – С. 52–61.
10. Климатические изменения в морской Арктике в начале XXI века / Г. В. Алексеев, Н. Е. Иванов, А. В. Пнюшков, Н. Е. Харланенкова // Метеорол. и геофиз. исслед. – М. : Paulsen, 2011. – С. 6–28.
11. Кондратьев К. Я. Неопределенность данных наблюдений и численного моделирования климата / К. Я. Кондратьев // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 4. – С. 93–119.
12. Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых, О. А. Рубцова // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – № 12. – С. 1042–1050.
13. Монин А. С. Климат как проблема физики / А. С. Монин, Ю. А. Шишков // Успехи физ. наук. – 2000. – Т. 170, № 4. – С. 419–445.
14. Мордвинов А. В. Долговременные изменения интегрального потока излучения Солнца и погрешности их оценок / А. В. Мордвинов // Солнечно-земная физика. – 2010. – Вып. – 15. С. 9–12.
15. Мохов И. И. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и глобальной приповерхностной температуры Земли / И. И. Мохов, Д. А. Смирнов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 44, № 3. – С. 283–293.
16. Рубцова О. А. Проявление изолированных гелиогеофизических возмущений в высокоширотной тропосфере / О. А. Рубцова, В. А. Коваленко, С. И. Молодых // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 6. – С. 532–535.
17. Gray L. J. Solar influences on climate / L. J. Gray, J. Beer, M. Geller // Rev. Geophys. – 2010. – Vol. 48. – P. 1–53.
18. De Jager C. The variable solar dynamo and the forecast of solar activity: Influence on terrestrial surface temperature / C. De Jager, S. Duhau // Global Warming in the 21st Century. – 2011. – Ch. 3. – P. 77–106.
19. Intergovernmental Panel on climate change. Climate change. – Cambridge University Press, 1995.

20. Levitus S. Warming of the world ocean, 1955–2003 / S. Levitus, J. Antonov, T. Boyer // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32. – L02604. doi: 10.1029/2004GL021592.

21. Levitus S. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems / S. Levitus, J. Antonov, T. Boyer // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. Vol. 36, L07608. – doi:10.1029/2008GL037155.

22. Mufti S. Solar-geomagnetic activity influence on Earth's climate / S. Mufti, G. N. Shah // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2011. – Vol. 73. – P. 1607–1615.

23. Stauning P. Solar activity – climate relations: A different approach / P. Stauning // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2011. – Vol. 71. – P. 1999–2012.

24. Zherebtsov G. A. The physical mechanism of the solar variability influence on electrical and climatic characteristics of the troposphere / G. A. Zherebtsov, V. A. Kovalenko, S. I. Molodykh // *Adv. Space Res.* – 2005a. – Vol. 35. – P. 1472–1479.

Influence of solar activity on temperature of the troposphere and ocean surface

G.A. Zherebtsov, V. A. Kovalenko, S. I. Molodykh, K. E. Kirichenko

Annotation. In this paper we examine the influence of solar activity on temperature variations in the atmosphere and global ocean. We discuss results of the analysis of regularities and peculiarities of tropospheric and sea surface temperature responses both to some heliogeophysical disturbances and to long-term changes in solar and geomagnetic activity. We present results of the analysis of sea surface temperature (SST) variations, obtained over a period from 1854 to 2012, and their connection with solar activity variations. We have found further evidence for the influence of solar activity on climate processes in the troposphere and ocean. An authentic response to solar activity was revealed in main climatic characteristics: surface air temperature (SAT) and sea surface temperature. We established that the climatic response to solar and geomagnetic activity features considerable space-time inhomogeneity and is local. We revealed regular variations in the spatial structure of climate-system response to geomagnetic activity.

Key words: climate system, climate, weather, solar activity.

Жеребцов Гелий Александрович
доктор физико-математических наук,
академик РАН
Институт солнечно-земной физики СО РАН
советник РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: (3952) 42–82–65

Gherebtsov Gelii Aleksandrovich
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
akademician RAN
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB
RAS
126a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42–82–65

Коваленко Владимир Афанасьевич
доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки РФ
Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а,
главный научный сотрудник,
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Марса, 1,

Kovalenko Vladimir Afanasyevich
Doctor of Physical-Mathematical Sciences
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB
RAS
126a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
Chief Research Scientist
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003

Молодых Сергей Иванович
кандидат физико-математических наук
Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а,
ведущий научный сотрудник
тел.: (3952) 56-45-25

Molodykh Sergey Ivanovich
Ph. D. in Physical-Mathematical Sciences
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB
RAS
126a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
Research Scientist
tel.: (3952) 56-45-25

Кириченко Кирилл Евгеньевич
Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а,
аспирант

Kirichenko Kirill Evgeniyvich
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB
RAS
126a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
Post-Graduate Student