

**ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ  
НА ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПОСФЕРЫ**

Г.А. Жеребцов, В.А. Коваленко

**SOLAR ACTIVITY EFFECT ON WEATHER-CLIMATIC CHARACTERISTICS  
OF THE TROPOSPHERE**

Г.А. Zherebtsov, V.A. Kovalenko

Обсуждаются вопросы, которые имеют первостепенное значение для понимания природы климатических изменений в XX в., и основные физические процессы, ответственные за эти изменения. Рассматривается возможная роль солнечной активности в изменениях климата на Земле в прошлом и в будущем. Показано, что физические механизмы, которые могут обеспечить влияние солнечной активности на погоду и климат, сводятся к регулированию потока энергии, уходящего от Земли в космос. Особое внимание уделяется механизму влияния солнечной активности на климатические характеристики тропосферы через атмосферное электричество. Рассмотрены особенности отклика теплового и динамического режимов Мирового океана и атмосферы на изменение солнечной активности, процессов в атмосфере, океане и криосфере. Приведены и обсуждаются результаты анализа закономерностей и особенностей реакции тропосферы и температуры поверхности океана (ТПО) как на отдельные гелиоаэрофизические возмущения, так и на долговременные изменения солнечной и геомагнитной активности. Обсуждаются результаты анализа пространственно-временной структуры отклика на изменения уровня гелиоаэрофизической активности в тропосфере и ТПО.

*Ключевые слова:* climatic system, climate, weather, solar activity.

We discuss problems which are of the main importance for understanding the origin of climate changes in XX century and basic physical processes responsible for these changes. The possible role of solar activity in the Earth's climate changes in the past and future is considered. As shown, physical mechanisms which can provide for solar variability effect on weather and climate come to controlling the energy flux from the Earth to space. A special emphasis is given to mechanism of solar activity effect on climatic characteristics of the troposphere through the atmospheric electricity. We consider peculiarities of the response of thermal and dynamic regimes of the ocean and atmosphere to solar activity changes, processes in the atmosphere, ocean and cryosphere. We also show and discuss the results of analysis of regularities and peculiarities of the troposphere and ocean surface temperature (OST) response to both isolated heliogeophysical disturbances and to long-term changes of solar and geomagnetic activity. The results of analysis of space-time structure of the response to changes of heliogeophysical activity level in the troposphere and OST.

*Key words:* Climatic system, climat, weather, solar activity.

### **Введение**

Несмотря на то, что исследование проблемы влияния солнечной активности на погоду и климат имеет длительную историю, 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 с учетом того, что роль антропогенного фактора в этот период не уменьшалась. На основе комплексного анализа данных наблюдений гидрометеорологических характеристик тропосферы и океана получены новые доказательства воздействия солнечной активности на климатические процессы [Gray et al., 2010; De Jager, Duhau, 2010; Жеребцов и др., 2011a].

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 количественные оценки вкладов различных факторов в изменения 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  $\text{CO}_2$  не означают, что причиной увеличения ГТ является возрастание концентрации  $\text{CO}_2$ . Реально наблюдаемое увеличение температуры океана также приводит к увеличению содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере, поэтому такое изменение может быть следствием, а не причиной ГП [Монин, Шишков, 2000]. Наиболее весомым и обоснованным аргументом, заставляющим сомневаться в том, что наблюдаемое ГП обусловлено только вкладом  $\text{CO}_2$  антропогенного происхождения, является отсутствие ответа на вопрос о причинах существования теплых и холодных периодов в прошлом тысячелетии, а также увеличение глобальной приземной температуры на  $0.5^\circ$  в период с 1890 по 1940 г., когда вклад  $\text{CO}_2$  антропогенного происхождения был незначителен. А чем объяснить понижения глобальной температуры Северного полушария в период 1940–1970 гг., в то время как антропогенные вы-

бросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу в этот период непрерывно возрастили? Отметим, что в этот период солнечная активность также возрастила. Очевидно, что природа этого похолодания обусловлена исключительно естественными изменениями климатической системы. Все это требует понимания физических процессов в климатической системе, дающих заметный вклад в наблюдаемые климатические изменения.

### Изменение климата в прошлом

Колебания климата в прошлом происходили внезапно, временами вступая в ледниковую fazu или fazu mежледникового потепления. Не касаясь природы этих изменений, рассмотрим эмпирические данные с высоким времененным разрешением от десятков до сотен лет для выявления максимальных скоростей изменения ПТВ в прошлом.

Недавние исследования древних льдов, образцы которых были получены при бурении ледяного покрова Гренландии и Антарктиды, позволили получить информацию о глобальных потеплениях и похолоданиях на различных временных масштабах [Борзенкова и др., 2005]. На основе кислородно-изотопного ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) анализа льда гренландского керна Саммит были получены данные об изменении температуры в высоких широтах Северного полушария за последние 250 тыс. лет. За последние 18 тыс. лет выделено около 30 глобальных потеплений и похолоданий различной продолжительности. В течение этого времени выделяются три интервала, на которых изменение глобальной температуры составляло не менее  $1.5^\circ\text{C}$  за 100 лет. Наиболее значительное потепление соответствует переходу от похолодания позднего дриаса ( $10.3\text{--}10.5$  тыс. лет тому назад) к потеплению раннего голоцен, когда температура воздуха на высоких широтах возросла на  $5\text{--}7^\circ$  за несколько десятков лет. Кроме того, была обнаружена связь между изменениями содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере и колебаниями температуры.

Новый метод количественной оценки температуры воздуха, основанный на измерении изотопного соотношения азота ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) и аргона ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) в образцах гренландского льда, позволил уточнить амплитуды изменений температуры и подтвердить реальность существования быстрых (десятки лет) изменений климата в прошлом [Борзенкова и др., 2005].

Таким образом, анализ временных изменений температуры воздуха в прошлом показал, что скорость изменения температуры воздуха в высоких широтах была не только сопоставима со скоростью изменения температуры в XX в., но и значительно превышала ее. Переход от очень холодных климатических условий к теплым в отдельные периоды происходил очень быстро (практически мгновенно с геологической точки зрения) – в течение нескольких десятков лет, причем, как правило, скорость возрастаания температуры была значительно выше, чем скорость понижения. Следует отметить, что оценки изменений температур по кернам льда (Гренландский и Антарктический) отражают изменения температур высоких широт. Изменения температуры низких широт и соответственно глобальной температуры значительно меньше. В работе [Мохов, Смирнов, 2008] установлено, что изменения температуры воздуха имеют практически синхронный ход с изменениями концентрации парниковых газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Быстрые повышения температуры воздуха сопровождались быстрым ростом концентрации углекислого газа и метана, которые совместно с водяным паром определяют парниковый эффект. Анализ вариаций температуры и содержания парниковых газов в атмосфере с целью оценки причинно-следственных связей в естественных долговременных процессах земной климатической системы для сопоставления с оценками соответствующих связей современных изменений приведен в [Дымников и др. 2004, Мохов, Смирнов, 2008]. Получено, что для короткопериодных вариаций наблюдаются эффекты опережения вариаций температуры по сравнению с изменениями содержания в атмосфере парниковых газов, особенно метана.

нов, 2008] установлено, что изменения температуры воздуха имеют практически синхронный ход с изменениями концентрации парниковых газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Быстрые повышения температуры воздуха сопровождались быстрым ростом концентрации углекислого газа и метана, которые совместно с водяным паром определяют парниковый эффект. Анализ вариаций температуры и содержания парниковых газов в атмосфере с целью оценки причинно-следственных связей в естественных долговременных процессах земной климатической системы для сопоставления с оценками соответствующих связей современных изменений приведен в [Дымников и др. 2004, Мохов, Смирнов, 2008]. Получено, что для короткопериодных вариаций наблюдаются эффекты опережения вариаций температуры по сравнению с изменениями содержания в атмосфере парниковых газов, особенно метана.

### Солнечная активность и климат

Изучение влияния солнечной активности на погоду и климат имеет давнюю историю. Сравнение характеристик климата и солнечной активности на больших временных масштабах обнаруживает большое сходство в поведении. Исторические данные показывают, что наблюдаемые значимые изменения климата могут быть обусловлены солнечной переменностью. В частности, есть основания полагать, что именно с вариациями солнечной активности были связаны периоды похолоданий и потеплений, по крайней мере, в предыдущем тысячелетии. Мировой климат за последние 1000 лет испытывал изменения, довольно точно соответствующие вариациям солнечной активности: в XII в., когда солнечная активность была высока, отмечался теплый период (средневековый климатический оптимум), а два четких понижения температуры в малый ледниковый период (XVI–XVII вв.) соответствуют минимумам Маундера и Шперера. После окончания минимума Маундера наступил общий подъем уровня солнечной активности, и в течение большей части этого периода мировой климат становился теплее.

Тем не менее, несмотря на многочисленные работы, в которых установлены достоверные, статистически значимые связи между различными индексами гелиогеофизической активности и погодно-климатическими характеристиками, вопрос о том, вносит ли солнечная активность значимый вклад в изменение климата, до сих пор остается нерешенным. В последних обзорах [см. напр., Gray et al., 2010] солнечная переменность рассматривается в качестве одной из важных причин 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 %

(рис. 1) [Мордвинов, 2010]. Именно данная характеристика включается во все численные климатические модели. В связи с этим многие климатологи решительно отвергают саму возможность воздействия солнечной активности на климат.

Значительная часть изменений СП относится к рентгеновскому и ультрафиолетовому излучениям, которые поглощаются полностью в ионосфере и верхней стратосфере. Поток энергии солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), солнечных и галактических космических лучей, вариации которых более значительны в цикле солнечной активности, составляет  $10^{-6}$  от изменений СП. Практически все эти потоки энергии, так же как и часть изменяющейся СП, реализуются в верхней атмосфере – магнитосфере, ионосфере и стратосфере Земли.

### 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;  $\delta$  – коэффициент черноты поверхности;  $\sigma$  – 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:

$$dT_e = T_e / 4L_0 dL_0.$$

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.  $dL_0 = 2.4 \text{ К}\cdot\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ , то  $dT_e = 0.65 \text{ К}$ . С атмосферой  $\beta = 0.6 \text{ К}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ . Межправительственный комитет по изменению климата рекомендует  $\beta_0 = 0.625 \text{ К}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ . Таким образом, изменения СП на 1 % соответствуют изменению глобальной ПТВ на 1 К.

По 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 °C. Это позволяет сделать вывод о том, что наблюдаемые изменения СП не могут значимо повлиять на глобальную температуру океана и атмосферы.

Таким образом, непосредственно связанная с солнечной активностью изменяющаяся часть потока энергии, падающего на верхнюю границу атмосферы Землю, не может обеспечить изменение энергетики земной климатической системы. Расчеты, проведенные в рамках глобальных климатических моделей [Мохов, Смирнов, 2008], 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

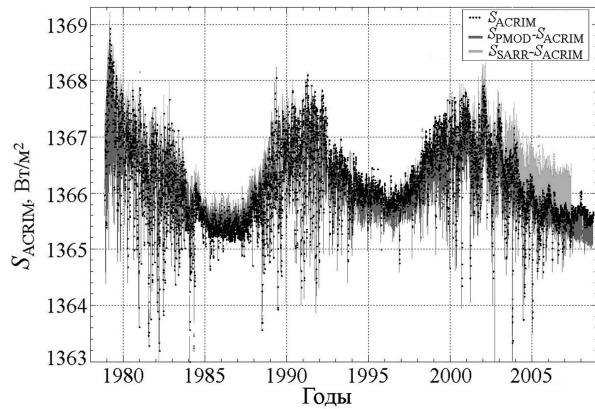


Рис. 1. Полный поток излучения Солнца в шкалах ACRIM и PMOD.

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 [Mufti, Shah, 2011] 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. Таким образом, не менее важным, а скорее, даже первостепенным является вопрос об изменениях потока энергии, излучаемого Землей и атмосферой в космос. Ключевая роль в регулировании этого потока принадлежит облачности и малым составляющим, в частности, таким как H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, метан и др.

### Модель воздействия солнечной активности на тропосферу

В работах [Жеребцов и др., 2004, 2005, 2008] была предложена физическая модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли. Ключевая концепция модели – влияние гелиофеофизических возмущений (ГГВ) на параметры земной климатической системы, управляющие потоком энергии, уходящей от Земли в космос в высоколатитных областях. Величина энергии, необходимая для регулирования этого потока, может быть достаточно малой и не иметь принципиального значения. Основным агентом солнечной активности, оказывающим влияние на погодно-климатические характеристики тропосферы, являются параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, которые определяют геомагнитную активность и влияют на изменение элек-

трического поля высоколатитной атмосферы. Кроме того, определенный вклад в изменение электрического поля высоколатитной тропосферы вносят большие потоки солнечных космических лучей (СКЛ), генерируемые во время солнечных вспышек. Наиболее эффективно это влияние проявляется в высоколатитных областях (в зоне аврорального овала в период магнитосферных возмущений и в области полярной шапки с максимумом на геомагнитном полюсе во время вторжения СКЛ).

При возрастании уровня солнечной активности происходит уменьшение радиационного выхолаживания высоколатитных областей, рост температуры нижней и средней тропосферы, перестройка термобарического поля, уменьшение среднего меридионального градиента температуры между полярными и экваториальными областями, который определяет меридиональный перенос тепла. Это сопровождается уменьшением оттока тепла из низколатитных областей, что приведет к увеличению приземной температуры воздуха (ПТВ) средних и низких широт, увеличению теплосодержания океана и климатической системы в целом.

Следует подчеркнуть, что первичная реакция в соответствии с рассмотренным механизмом – фазовый переход водяного пара и выделение скрытого тепла – приводит лишь к незначительному увеличению температуры в областях формирования облачности. Наиболее важным и принципиальным в предложенной модели является последующее изменение радиационного баланса.

С учетом данной модели [Жеребцов и др., 2005] следует ожидать следующие особенности отклика атмосферы на воздействие солнечной активности:

1. Максимальный отклик следует ожидать в высоколатитных областях, так как именно здесь наблюдается значительное увеличение электрического потенциала Земля–ионосфера во время гелиогеофизических возмущений.

2. Отклик будет существенно зависеть от высоты в атмосфере. Следует ожидать противоположных изменений температуры в нижней и верхней тропосфере.

3. Отклик наиболее выражен в зимний период, когда мал или отсутствует приходящий коротковолновый поток.

### Отклик высоколатитной тропосферы на изолированные гелиогеофизические возмущения

На основе данных NCEP/NCAR Reanalysis был проведен анализ отклика термобарических характеристик тропосферы на отдельные ГГВ: вторжение аномально больших потоков СКЛ и значительные геомагнитные возмущения (магнитные бури) в период 1968–2005 гг. Следует отметить, что, как правило, через 1–2 сут после вторжения СКЛ наблюдаются значительные геомагнитные возмущения. Для каждого события были построены ежедневные карты аномалий давления и температуры на стандартных уровнях для Северного полушария. На основе этих карт был проведен анализ изменений поля давления и температуры для стандартных уровней высоколатитной тропосферы в период аномальных гелиогеофизических возмущений. В работах [Руб-

цова и др., 2008] было показано, что после ГГВ наблюдается изменение типичного зонального переноса, которое проявляется в том, что возникает стационарирование отдельных движущихся структур. Кроме того, оказалось, что именно области стационарирования являются областями максимального отклика тропосферы на ГГВ.

В качестве примера на рис. 2 представлены гелиогеофизические характеристики для одного из типичных событий. Аномально большой поток СКЛ наблюдался 7 ноября 2004 г. На второй день после прихода потока СКЛ имела место экстремальная магнитная буря. Это можно видеть по данным индексов геомагнитной активности  $K_p$  и  $D_{st}$ , приведенным на рис. 2. В качестве реперной даты (нулевой день) был выбран день прихода потока СКЛ.

Последовательные изменения высотного профиля отклонений температуры воздуха от дня, предшествующего началу ГГВ (–1 день), в области стационарирования ( $55\text{--}65^\circ\text{N}$ ,  $205\text{--}215^\circ\text{E}$ ) в период с 7.11.2004 по 12.11.2004 г. приведены на рис. 3. Очевидно, что после ГГВ наблюдается возрастание температуры воздуха от поверхности Земли до уровня 300 гПа и уменьшение температуры выше этого уровня. Максимальный рост температуры воздуха в области стационарирования наблюдается на четвертый день ГГВ (10.11.2004 г.).

Существует суммарному воздействию двух составляющих гелиогеофизической возмущенности, которые оказывают влияние на электрическое поле высоколатитной тропосферы, – потока солнечных космических лучей и магнитосферной конвекции.

Анализ изменения теплосодержания тропосферы 925–500 гПа в областях проявления и для всей широтной зоны  $50\text{--}90^\circ\text{N}$ , вызванного отдельными ГГВ, показал, что наблюдается возрастание теплосодер-

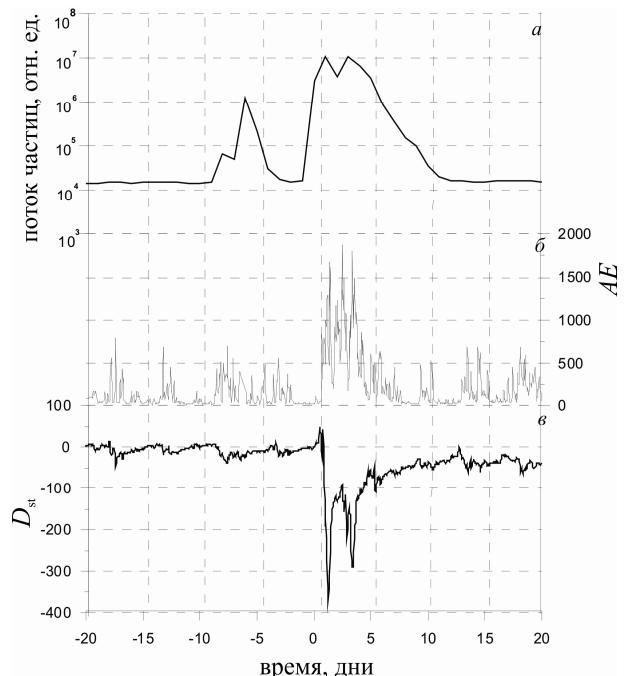


Рис. 2. Характеристики гелиогеофизического возмущения: поток солнечных космических лучей (а), индексы  $AE$  (б) и  $D_{st}$  (в). По горизонтальной оси отложено время относительно начала ГГВ.

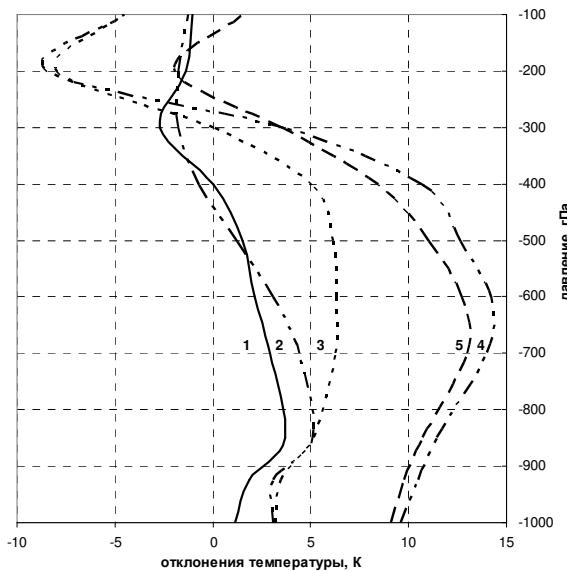


Рис. 3. Высотный профиль отклонений температуры воздуха от дня, предшествующего началу ГГВ, в области стационарирования в период 7.11.2004–12.11.2004 гг. в широтно-долготной зоне 55–65° N, 145–155° W: 1 – 0 день (день ГГВ), 2–5 – первый, второй, четвертый и шестой день после начала ГГВ.

жания нижней и средней тропосферы, которое может достигать нескольких процентов от амплитуды сезонного хода [Рубцова и др., 2008]. Необходимо отметить, что реальное увеличение теплосодержания климатической системы будет значительно больше, так как не учитываются потоки тепла в подстилающую поверхность (особенно в океан), а также скрытое тепло.

#### Долговременные изменения температуры поверхности океана

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. 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. Изменения потерь тепла в высоких широтах приводят к соответствующим изменениям меридионального градиента температуры, что сопровождается изменением циркуляции и оттока тепла от низких широтных областей. Таким образом, изменения потерь тепла в высоких широтах оказывают значительное влияние на теплосодержание земной климатической системы и климат.

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 °C. Рост

средней глобальной температуры воздуха в последние 100 лет не был монотонным. Данные наблюдений показывают наличие весьма значительной пространственно-временной неоднородности изменений среднегодовой ПТВ. Это проявилось, например, в том, что потепление климата в XX в. происходило в течение двух периодов: 1919–1945 и 1977–2000 гг., а после 2000 г., как видно на рис. 4, геомагнитная активность существенно уменьшилась, а потепление практически прекратилось.

В период 1940–1970 гг. в Северном полушарии наблюдалось похолодание. Необходимо подчеркнуть очень важную и принципиальную особенность: как первое, так и второе потепление в высоких широтных и среднеширотных областях наблюдалось в основном в холодный период года [Жеребцов и др., 2011а]. В соответствии с климатическими моделями, которые включают как естественные, так и антропогенные факторы, проявления потепления с широтой значительно различаются. В частности, из глобальных климатических моделей следует, что при увеличении концентрации парниковых газов в атмосфере на начальной стадии потепления, когда в полярных областях значительная часть тепла расходуется на таяние льдов, следует ожидать наибольшего потепления в умеренных широтах [Дымников и др., 2004]. В соответствии с предложенной нами моделью закономерности противоположны, т. е. в первую очередь должно проявляться потепление в высоких широтах с последующим распространением к низким широтам [Жеребцов и др. 2011б]. Кроме того, максимальный рост температуры воздуха должен наблюдаться в холодный период года, когда в полярных областях мал или отсутствует приходящий коротковолновый поток солнечной радиации и появление любой облачности будет приводить к уменьшению радиационного выхолаживания тропосферы ниже уровня облакообразования, т. е. к потеплению.

Увеличение солнечной и геомагнитной активности в начале XX в. совпало с положительной фазой Северного Атлантического колебания [Алексеев 2006], 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 [Фролов и др. 2010]. Это сопровождалось усилением меридиональной циркуляции в атмосфере и поверхностных водах океана, соответствующим интенсивному меридиональному переносу тепла в Арктику в 1900–1940 гг. Увеличение температуры тропосферы в период 1910–1940 гг.

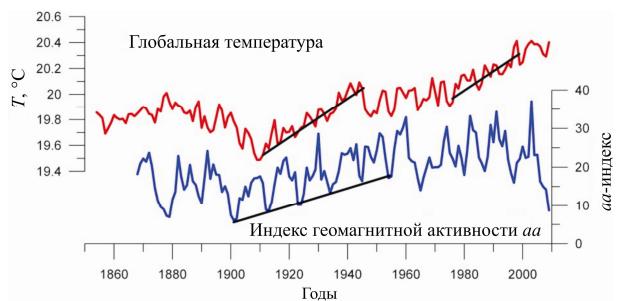


Рис. 4. Среднегодовые значения ТПО (60° N – 60° S; 0–360°) и индекса геомагнитной активности aa.

началось раньше в полярных областях с запаздыванием относительно возрастания геомагнитной активности примерно на 10 лет, которое связано с большой теплоемкостью Арктического бассейна. Эффективное воздействие геомагнитной активности на радиационный баланс полярных областей обеспечило уменьшение радиационного выхолаживания и увеличение ПТВ в высокотропных областях. С некоторым запаздыванием (1920–1940 гг.) началось эффективное таяние морского льда в Арктическом бассейне и сокращение его площади в теплый сезон (рис. 5). 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.

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 и ТПО, особенно значительное в полярных областях Северного полушария.

#### Проявление солнечной активности в температуре поверхности океана

В соответствии с основными положениями модели влияния солнечной активности на тропосферу, предлагаемыми авторами [Жеребцов и др., 2005б], был проведен анализ связи долговременных изменений ТПО и геомагнитной активности на основе данных наблюдений. Оказалось, что глобальная ТПО коррелирует с геомагнитной активностью (рис. 6). Установлено, что 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).

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.

На рис. 7 представлены карты пространственного распределения коэффициента корреляции между ТПО и  $aa$ -индексом геомагнитной активности для четырех периодов на разных фазах квазишестидесятилетней вариации. 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. Этот эпоха соответствует

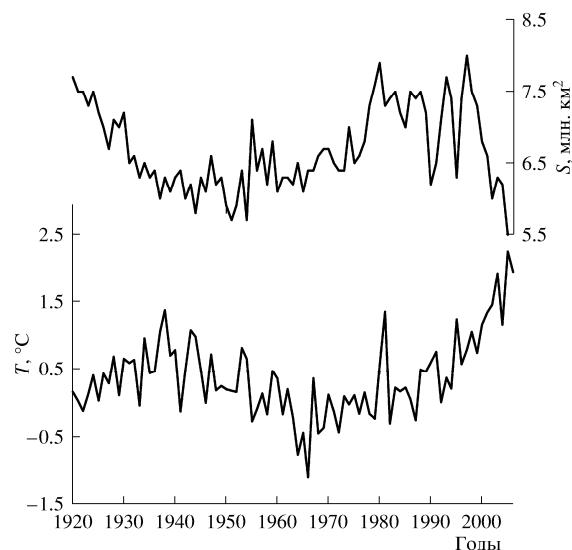


Рис. 5. Изменения площади льда в Арктике и аномалий приземной температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария (57.5–87.5 N).

наиболее длительному периоду возрастания геомагнитной активности в рассмотренный период, в конце которого среднегодовые минимальные значения геомагнитной активности превысили максимальные в начале эпохи (рис. 4).

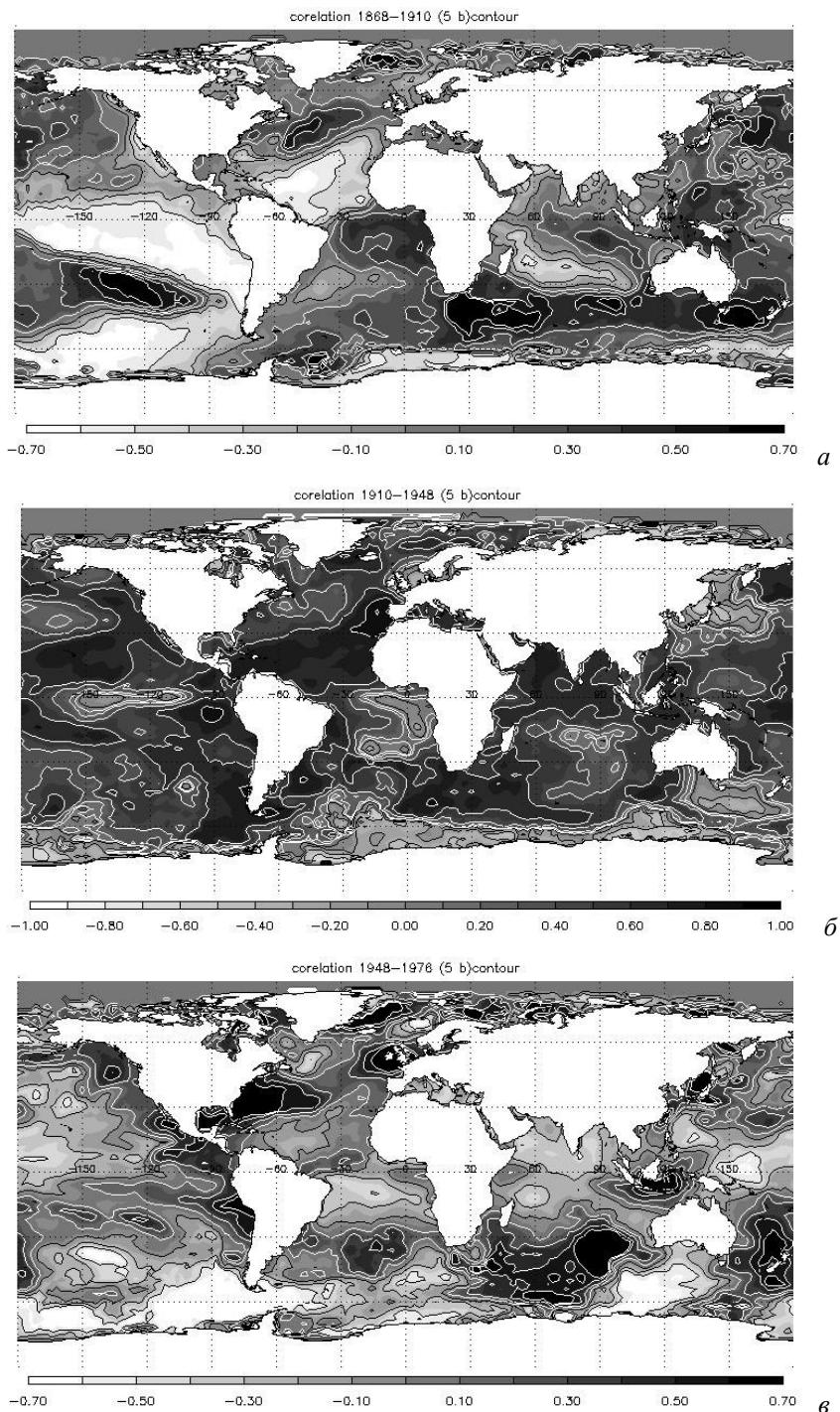
Кроме того, выявлены регионы, в которых во все эпохи знак связи между ТПО и  $aa$  остается положительным. В качестве примера на рис. 8 приведены данные по ТПО и геомагнитной активности для одного из регионов.

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.

В заключение отметим некоторые важные и принципиальные особенности функционирования земной климатической системы в XX в. Во-первых, скорость изменения как глобальной приземной температуры воздуха, так и температуры в высоких широтах в прошлом была не только сопоставима со скоростью изменения температуры в XX в., но и значительно превышала ее. Переход от очень холодных климатических условий к теплым в отдельные периоды происходил очень быстро в течение нескольких десятков лет. Аномалии ПТВ в периоды 1940–1975 гг., так же как и изменения теплосодержания Мирового океана, являются следствием особенности отклика теплового и динамического режимов Мирового океана и атмосферы на изменения процессов в атмосфере и океане, начало которых связано с потеплением в полярных областях в начале XX в. Исключительно важная роль при этом принадлежит изменениям массы и площади морского льда в Арктическом бассейне и величины стока северных рек, которые оказывают значительное влияние на характеристики термохалинной циркуляции и энергообмен атмосферы с океаном. Для оценки



Рис. 6. Среднегодовые значения температуры поверхности океана в зоне 60° N–60° S; 0–360° и индекса геомагнитной активности aa.



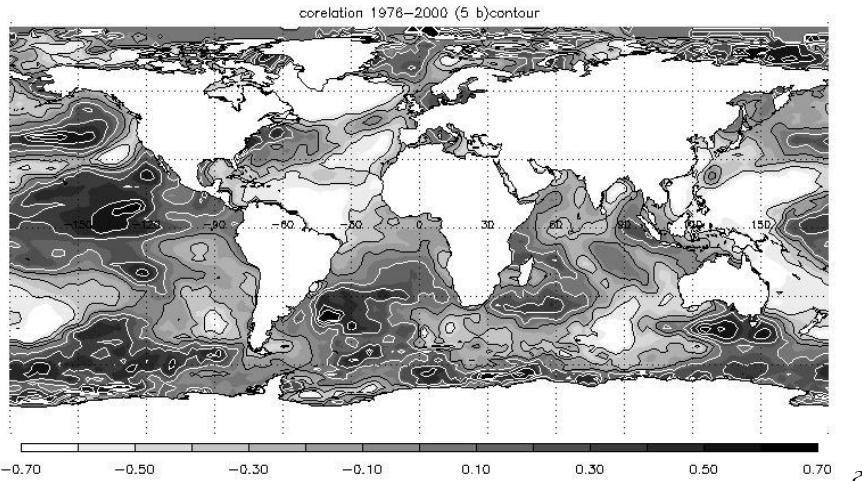


Рис. 7. Карты корреляций между сглаженными значениями ТПО и *aa*-индекса геомагнитной активности в течение 1868–2000 гг. для различных климатических эпох: 1868–1910 (а); 1910–1948 (б); 1948–1976 (в); 1976–2000 (г).

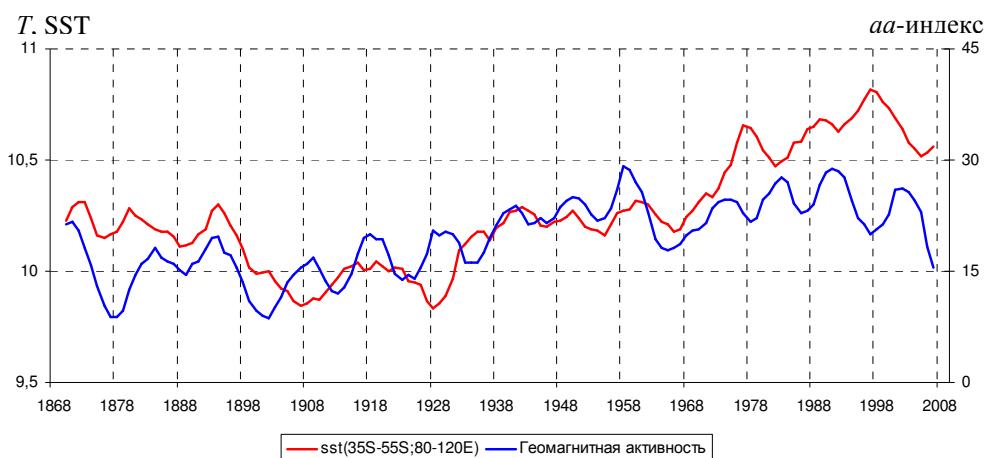


Рис. 8. Среднегодовые сглаженные по пяти годам значения ТПО (SST) в зоне 35–55° S; 80–120° E и геомагнитная активность *aa*-индекс (коэффициент корреляции 0.72).

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

Географическая область	Среднегодовые	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

реального количественного вклада как солнечной активности, так и антропогенных факторов в изменения глобальной ПТВ, теплосодержания атмосферы и океана необходимо учитывать изменения циркуляции в атмосфере и океане и эффективность энергообмена океан–атмосфера. Результаты проведенного анализа закономерностей изменений геомагнитной активности и термобарических характеристик тропосфера в рамках рассматриваемой модели, а также учет быстрых изменений глобальной циркуляции в атмосфере и океане позволяют сделать вывод о том, что значительная часть наблюдаемого потепления в XX в. может быть обусловлена изменением уровня солнечной активности.

Есть основания считать, что глобальное потепление в настоящее время практически закончилось и

следует ожидать медленного понижения ПТВ в период 2010–2040 гг., в первую очередь в Северном полушарии над сушей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г.В. Изменение климата Арктики в XX столетии / Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий. М.: Наука, 2006. 408 с.

Борзенкова И.И., Жильцова Е.Л., Лобанов В.А. Быстрые колебания климата в позднеледниковом голоцене. Анализ эмпирических данных и возможных причин / Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии. СПб.: Наука, 2005. С. 139–151.

Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я. и др. Чувствительность климатической системы к малым внеш-

ним воздействиям // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 77–92.

Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности // Оптика атмосферы и океана. 2004. № 12. С. 1003–1017.

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. № 12. С. 1042–1050.

Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Роль солнечной и геомагнитной активности в изменении климата Земли // Оптика атмосферы и океана. 2008. № 1. С. 53–59.

Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения // Изв. Иркутского государственного университета. Сер. «Науки о Земле». 2011а. Т. 4, № 1. С. 87–108.

Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Основные физические процессы в атмосфере Земли, криосфере и океане, определяющие особенности климатических изменений в XX в. и их связь с солнечной активностью // Солнечно-земная физика. 2011б. Вып. 18. С. 40–50.

Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Влияние гелиогеофизических возмущений полярной тропосферы на климатическую систему Земли // Метеорология и геофиз. исслед. М.: Paulsen, 2011. С. 251–268.

Кондратьев К.Я. Неопределенность данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 93–119.

Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170, № 4. С. 419–445.

Мордвинов А.В. Долговременные изменения интегрального потока излучения Солнца и погрешности их оценок // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 15. С. 9–12.

Мохов И.И., Смирнов Д.А. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и глобальной приповерхностной температуры Земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 3. С. 283–293.

Рубцова О.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Проявление изолированных гелиогеофизических возмущений в высоколатитной тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 532–535.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2. С. 52–61.

Gray L.J., Beer J., Geller M., et al. Solar influences on climate // Rev. Geophys. 2010. V. 48. P. 1–53.

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

Gray L.J. et al. Solar influences on climate // Rev. Geophys. 2010. V. 48. RG4001. doi:10.1029/2009RG000282.

De Jager C., Duhau S. The variable solar dynamo and the forecast of solar activity: Influence on terrestrial surface temperature // Global Warming in the 21<sup>st</sup> Century / Ed. Julian M. Cossia. ISBN: 2010. doi:978-1-61728-980-4.

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

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

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