

## Влияние солнечной активности на изменение климата

В.А. Коваленко, Г.А. Жеребцов\*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а*

Поступила в редакцию 18.11.2013 г.

Обсуждаются вопросы, имеющие 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 будущем. Показано, что физические механизмы, которые могут обеспечить влияние солнечной переменности на погоду и климат, сводятся к регулированию потока энергии, уходящего от Земли в космос в высокоширотных областях. 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 как на отдельные гелиогеофизические возмущения, так и на долговременные изменения солнечной и геомагнитной активности.

*Ключевые слова:* климат, океан, тропосфера, солнечная активность; climate, ocean, troposphere, solar activity.

### Введение

Исследование проблемы влияния солнечной активности (СА) на погоду и климат имеет длительную историю, однако 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<sub>2</sub> в атмосфере в этот период продолжает возрастать.

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. 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<sub>2</sub> не означают, что причиной увеличения ГТ является возрастание концентрации CO<sub>2</sub>. Реально наблюдаемое увеличение

температуры океана также приводит к увеличению содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере, поэтому такое изменение может быть следствием, а не причиной ГП [1, 2].

По мнению сторонников антропогенной природы глобального потепления в XX в., наиболее весомым аргументом является скорость роста приземной температуры воздуха, «беспрецедентно» большая (0,7°/100 лет) и ранее не наблюдавшаяся. Однако 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. На основе кислородно-изотопного (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) анализа льда гренландского керна Саммит были получены данные об изменении температуры в высоких широтах Северного полушария за последние 250 тыс. лет. Анализ временных изменений температуры воздуха в прошлом показывает, что скорость изменения температуры воздуха в высоких широтах была не только сопоставима со скоростью изменения температуры в XX в., но и значительно превышала ее [3]. 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.

### 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 показывает большое

\* Владимир Афанасьевич Коваленко (vak@iszf.irk.ru);  
Гелий Александрович Жеребцов (gzrb@iszf.irk.ru).

сходство в их поведении. Мировой климат за последние 1000 лет испытывал изменения, довольно точно соответствовавшие вариациям солнечной активности: в XII–XIII вв., 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 Шпеллера. Долговременные изменения солнечной активности в сопоставлении с климатическими характеристиками планеты показаны на рис. 1.

После окончания минимума Маундера наступил общий подъем уровня солнечной активности, особенно заметный в период с 1900 г. вплоть до 2000-х гг., и в течение большей части этого периода мировой климат становился теплее. Несмотря на многочисленные работы, в которых установлены достоверные, статистически значимые связи между различными индексами гелиогеофизической активности и погодно-климатическими характеристиками, вопрос «вносит ли солнечная активность значимый вклад в изменение климата?» до сих пор остается дискуссионным. Каковы основные причины, которые заставляют сомневаться в реальности и значимости влияния солнечной активности на погоду и климат?

1. Прежде всего, изменения потока энергии, достигающего тропосферы за счет изменений солнечной активности, пренебрежимо малы по сравнению с запасом энергии в стратосфере и тропосфере или даже с энергией одного циклона.

2. Отсутствует физический механизм, способный исчерпывающе объяснить многочисленные корреляции между различными гелиогеофизическими индексами и климатическими характеристиками тропосферы, а проявление связей на коротких временных интервалах носит статистический характер.

3. При исследовании влияния солнечной переменности на погоду и климат возникают трудности

в выделении проявления внешнего сигнала на фоне собственных возмущений в системе «атмосфера–океан».

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% [4]. 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, 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.

Таким образом, изменяющаяся часть потока энергии, падающего на верхнюю границу атмосферы Земли, связанная с солнечной активностью, непосредственно не может обеспечить изменение энергетики земной климатической системы. Расчеты, проведенные в рамках глобальных климатических моделей [5], также показывают, что изменения солнечной постоянной не могут внести значимый вклад в вариации глобальной температуры. В то же время в рамках эмпирических моделей [6–9] оценка вклада солнечной активности в изменения глобальной температуры воздуха в XX в. составляет около 70%. Поскольку отклик в изменении температуры тропосферы, по данным наблюдений, оказывается много больше, чем



Рис. 1. Долговременные изменения температуры воздуха и солнечной активности по непосредственным и косвенным данным наблюдений

следует из оценки прямого воздействия изменения СП на климат, предполагается существование трудно реализуемых нелинейных обратных связей.

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 первостепенным является вопрос об изменениях потока энергии, излучаемого атмосферой в космос.

### Модель влияния солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы

В работах [10, 11] была предложена физическая модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли. Ключевая концепция модели – влияние гелиогеофизических возмущений (ГГВ) 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 изменяются теплосодержание земной климатической системы и глобальный климат. В предложенной нами модели основным фактором, оказывающим влияние солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы, являются параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, которые определяют геомагнитную активность и солнечные космические лучи.

### Отклик высокоширотной тропосферы на изолированные гелиогеофизические возмущения

Данные NCEP/NCAR Reanalysis были использованы для анализа отклика термобарических характеристик тропосферы на отдельные гелиогеофизические возмущения: вторжение аномально больших потоков солнечных космических лучей (СКЛ) и значительных геомагнитных возмущений (магнитных бурь) 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 высокоширотной тропосферы в период аномальных гелиогеофизических возмущений. В работах [12, 13] было показано, что после ГГВ наблюдается изменение типичного зонального переноса, которое проявляется в том, что возникает «стабилизация» отдельных движущихся структур. Кроме того, оказалось, что именно области «стабилизации» 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 последовала экстремальная магнитная буря. Это можно видеть по данным индексов геомагнитной активности  $K_p$  и  $D_{st}$ , которые также приведены на рис. 2. В качестве реперной даты (0-й день) выбран день прихода потока СКЛ.

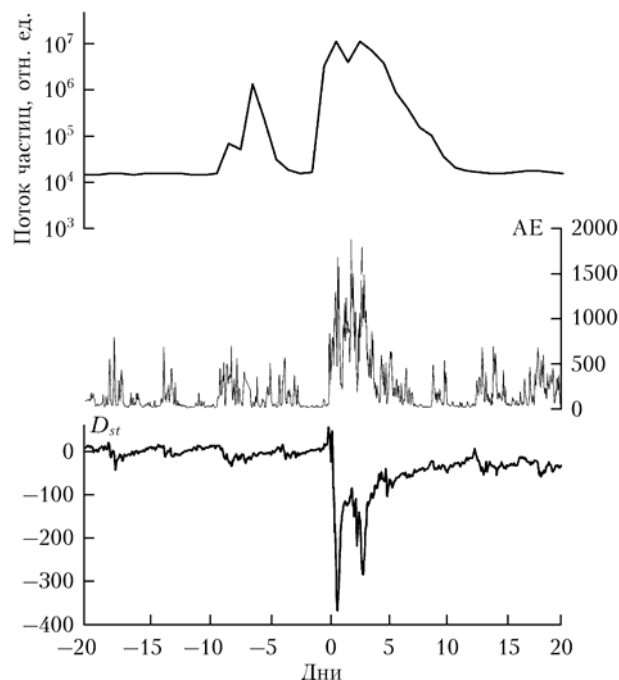


Рис. 2. Характеристики гелиогеофизического возмущения: поток солнечных космических лучей, индекс AE, индекс  $D_{st}$ . По горизонтальной оси отложено время относительно начала ГГВ

Последовательные изменения высотного профиля отклонений температуры воздуха от дня, предшествующего началу ГГВ (–1-й день) в области «стабилизации» ( $55\text{--}65^\circ$  с.ш.,  $145\text{--}155^\circ$  з.д.), 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 стабилизации наблюдается на 4-й день в слое 500–700 гПа.

Этот случай соответствует суммарному воздействию двух составляющих гелиогеофизического возмущения, которые оказывают влияние на электрическое поле высокоширотной тропосферы – потока

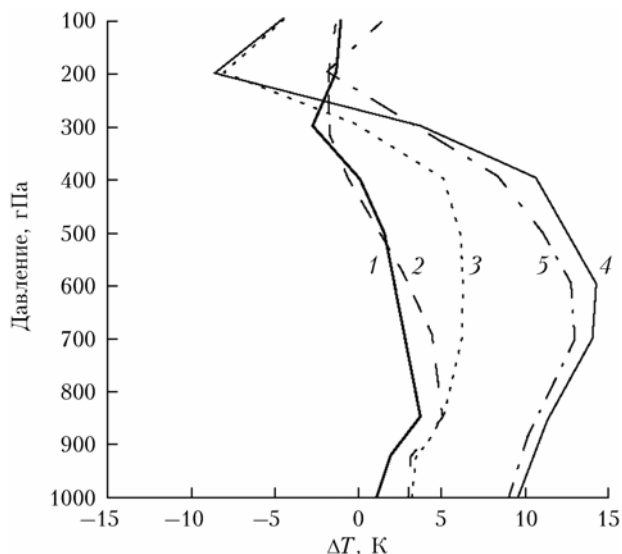


Рис. 3. Высотный профиль отклонений температуры воздуха от дня, предшествующего началу ГВ в области «стабионирования» (55–65° с.ш., 145–155° з.д.) в период с 7.11.2004 по 12.11.2004 г.: 1 – 0-й день (день ГВ); 2–5 – соответствующие дни после начала ГВ

солнечных космических лучей и магнитосферной конвекции. Анализ изменения теплосодержания тропосферы 925–500 гПа в областях проявления и для

всей широтной зоны 50–90° с.ш., вызванного отдельными ГВ, показал, что наблюдается возрастание теплосодержания нижней и средней тропосферы, которое может достигать нескольких процентов от амплитуды сезонного хода [14]. 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.

На основе наблюдательных данных с помощью многофакторного корреляционного анализа проведены исследования пространственной структуры отклика теплосодержания различных слоев тропосферы на изменения уровня гелиогеофизической активности (АА-индекс) [15]. Для расчета теплосодержания использованы данные NCEP/NCAR Reanalysis. В качестве примера на рис. 4 приведена карта пространственного распределения коэффициентов корреляции между теплосодержанием атмосферы и геомагнитным индексом АА за период 1950–1976 гг. Отклик теплосодержания на воздействие как солнечной, так и геомагнитной активности имеет достаточно выраженную пространственную структуру. В большей части тропосферы теплосодержание коррелирует с солнечной и геомагнитной активностью, однако в ряде регионов наблюдается значимая антикорреляция.

Таким образом, анализ данных наблюдений, в рамках разрабатываемой авторами модели влияния

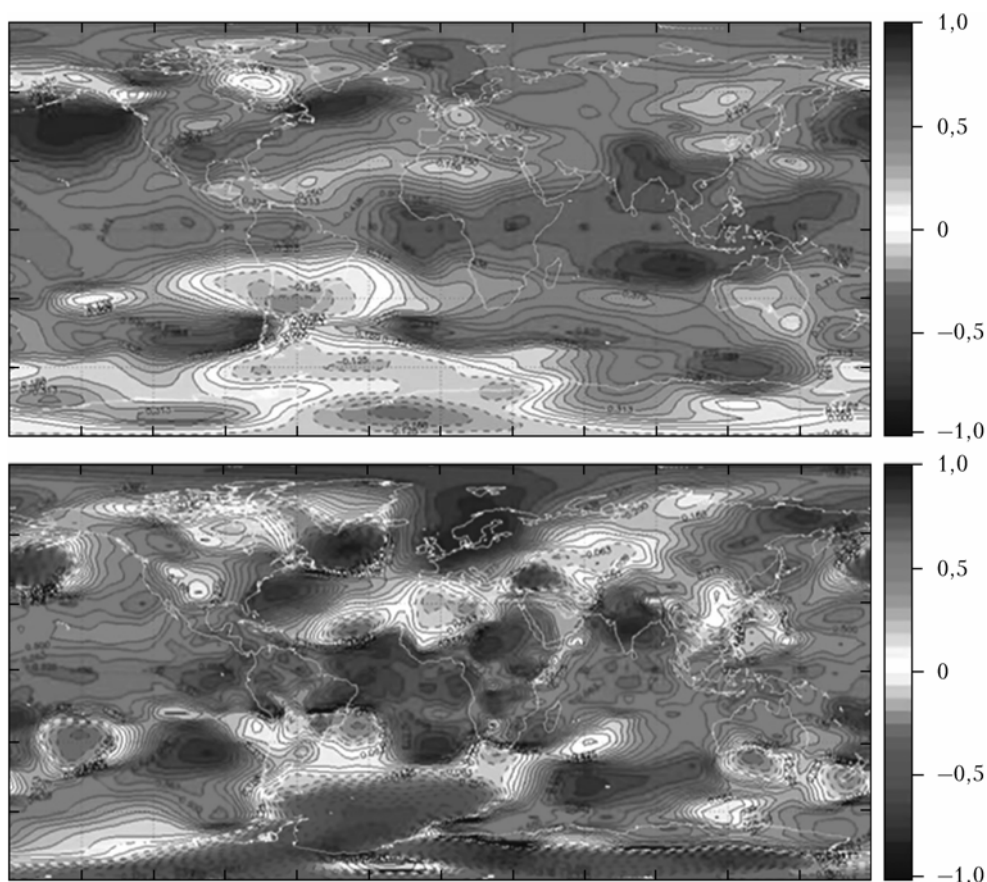


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между теплосодержанием атмосферы 850–400 (внизу), 300–150 гПа (вверху) и геомагнитным индексом АА за период 1950–1976 гг.

солнечной активности на климатическую систему, позволил получить новые доказательства влияния солнечной активности на климатические процессы в тропосфере и океане [16]. Выявлен достоверный отклик в основных климатических характеристиках: приземной температуре воздуха (ПТВ), теплосодержании атмосферы, температуре поверхности океана (ТПО) и осадках, на воздействия СА. Установлено, что климатический отклик на воздействие солнечной и геомагнитной активности характеризуется значительной пространственно-временной неоднородностью и носит региональный характер. Выявлены регионы, в которых аномалии ПТВ и ТПО в основном определяются солнечной активностью [13].

### Заключение

Результаты проведенного анализа закономерностей изменений геомагнитной активности и термобарических характеристик тропосферы и океана в рамках рассматриваемой модели, а также учет быстрых изменений глобальной циркуляции в атмосфере и океане позволяют сделать вывод о том, что значительная часть 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.

1. Кондратьев К.Я. Неопределенность данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорол. и гидрол. 2004. № 4. С. 93–119.
2. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170, № 4. С. 419–445.
3. 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.
4. Мордвинов А.В. Долговременные изменения интегрального потока излучения Солнца и погрешности их оценок // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 15. С. 9–12.
5. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и глобальной при-

- верхностной температуры Земли // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44, № 3. С. 283–293.
6. Mufti S., Shah G.N. Solar-geomagnetic activity influence on Earth's climate // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73, N 13. P. 1607–1615.
  7. Stauning P. Solar activity – climate relations: A different approach // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73, N 13. P. 1999–2012.
  8. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Роль солнечной и геомагнитной активности в изменении климата Земли // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 53–59.
  9. Gray L.J., Beer J., Geller M., Haigh J.D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Luterbacher J., Meehl G.A., Shindell D., van Geel B., White W. Solar influences on climate // Rev. Geophys. 2010. V. 48, N 4. P. 1–53.
  10. Zhrebtsov 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. A. 2005. V. 35, N 8. P. 1472–1479.
  11. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1042–1050.
  12. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А. Влияние гелиогеофизических возмущений полярной тропосферы на климатическую систему Земли // Метеорол. и геофиз. исслед. М.: Paulsen, 2011. С. 251–268.
  13. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Кириченко К.Е. Влияние солнечной активности на температуру тропосферы и поверхности океана // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле». 2013. Т. 6, № 1. С. 61–79.
  14. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 12. С. 1003–1017.
  15. 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. Иркут. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле». 2011. Т. 4, № 1. С. 87–108.
  16. 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. 2011. Вып. 18. С. 40–50.

V.A. Kovalenko, G.A. Zhrebtsov. **Influence of solar activity on climate changes.**

We discuss problems which are of 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.