

Г.А. Жеребцов, В.А. Коваленко, С.И. Молодых, О.А. Рубцова

## Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 5.10.2005 г.

Обсуждаются вопросы, которые имеют первостепенное значение для понимания и оценки возможной роли солнечной активности в изменениях климата на Земле в прошлом и в будущем.

Особое внимание уделяется механизму влияния солнечной активности на климатические характеристики атмосферы через тропосферное электричество. Анализируются основные причины, которые приводят к существенным изменениям электрического поля в атмосфере полярных широт Земли во время гелиогеофизических возмущений: солнечные космические лучи; протоны и электроны, высыпавшиеся из магнитосферы во время геомагнитных возмущений; усиления (возмущения) магнитосферной конвекции во время геомагнитных бурь.

Обосновывается, что этот механизм эффективно работает в высокоширотных областях, приводя к дополнительному формированию облачности в областях, где имеется достаточная концентрация водяного пара. Приведены оценки изменений температуры, давления и радиационного баланса в высокоширотных областях, в которых происходят изменения фазового состояния водяного пара за счет влияния гелиогеофизических факторов. Показано, что наибольшее и однозначное влияние солнечной активности на состояние климатической системы наблюдается в периоды отсутствия приходящего радиационного потока энергии (высокоширотные области в зимний период), так как в этом случае любая облачность приводит к уменьшению потерь энергии климатической системой.

В рамках разрабатываемой авторами модели и механизма солнечно-земных связей систематизированы и обобщены результаты исследований проявления солнечных вспышек и структуры межпланетного магнитного поля в термобарических характеристиках тропосферы.

### Введение

В настоящее время изучению природы глобального потепления, его проявлениям в регионах планеты и прогнозам изменений климата уделяется особое внимание. Обсуждаются три возможные причины:

1. Естественная изменчивость земной климатической системы (изменения циркуляции атмосферы и океана).

2. Антропогенное воздействие, связанное с человеческой деятельностью.

3. Влияние солнечной активности.

В серии работ [1–7] солнечная переменность рассматривается в качестве возможной причины глобального потепления. Сравнение изменений характеристик климата и солнечной активности на больших временных масштабах показывает большое сходство в их поведении. В частности, есть основания считать, что именно с вариациями солнечной активности были связаны периоды похолоданий и потеплений, по крайней мере в последнее тысячелетие. 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 дискуссионным. А в ряде ра-

бот (см., например, [8]) сама идея о влиянии солнечной активности на состояние нижней атмосферы и климат отвергается как совершенно неприемлемая.

Вопрос о том, в какой мере глобальное потепление в последние десятилетия имеет антропогенное происхождение – в противоположность естественному происхождению (например, за счет солнечной активности или вследствие естественной изменчивости глобальной климатической системы, вулканической деятельности и др.), имеет первостепенное значение как для понимания характера изменения климата на Земле в прошлом и в будущем, так и для планирования тех видов человеческой деятельности, которые могут оказывать влияние на климатическую систему Земли.

В связи с этим вопрос о вкладе солнечной активности в наблюдаемые изменения климата становится особенно актуальным. В подавляющем большинстве работ, посвященных изучению влияния солнечной активности на погоду и климат, предполагается, что энергия, необходимая для изменения климатических характеристик тропосферы, должна обеспечиваться извне. Однако известно, что изменения потока энергии, достигающего нижней тропосферы, за счет вариаций солнечной активности пренебрежимо малы по сравнению с запасом энергии в стратосфере и тропосфере или даже с энергией отдельных атмосферных образований (например, отдельного циклона).

Несмотря на это, по-прежнему при рассмотрении вопросов гелиоклиматических связей, особенно для длительных периодов, восстановленные характеристики солнечной активности переводят в энергетические ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ). Это встречает со стороны большинства климатологов и метеорологов категорическое (по нашему мнению, обоснованное) возражение против значимого влияния солнечной активности на климат Земли.

В рамках развиваемой авторами модели [9–12] основополагающим положением концепции влияния солнечной активности на климат является то, что внешние факторы оказывают воздействие на климатическую систему посредством управления потоком энергии, уходящей от Земли в космос. В этом случае величина энергии, необходимая для регулирования этого потока, может быть достаточно малой и не имеет принципиального значения.

В статье работе рассмотрены следующие вопросы:

- Основы и концепция электрооптического механизма воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы.
- Приведены результаты анализа данных наблюдений, показывающих проявление (отклик) солнечных космических лучей (СКЛ) и магнитосферных возмущений в параметрах атмосферного электричества и в термобарическом поле.
- Сформулирована и обоснована модель воздействия гелиогеофизических факторов на климатические характеристики тропосферы.
- Дана оценка вклада солнечной активности в изменение теплосодержания земной климатической системы.

## Электрооптический механизм

Авторами в работах [9–12] предложен электрооптический механизм влияния солнечной активности на климатические характеристики и циркуляцию атмосферы через атмосферное электричество.

Сущность механизма состоит в том, что усиление гелиогеофизической активности (потоки солнечных космических лучей, возмущения солнечного ветра и межпланетного поля, геомагнитные бури и суббури) приводит к увеличению разности электрического потенциала ионосфера – Земля. Увеличение разности потенциала сопровождается возрастанием вертикального электрического поля, которое приводит к перераспределению по высоте в тропосфере заряженных ядер конденсации (подъему отрицательно заряженных аэрозолей на большую высоту). При этом в областях, где ранее концентрация этих ядер была низкой, а содержание водяного пара достаточно высоким, происходят конденсация водяного пара и образование облачности. Формирование облачности сопровождается выделением скрытой теплоты и изменением радиационного баланса. Согласно [9] наибольшее влияние на радиационный баланс и термобарическое поле тропосферы этот механизм будет оказывать в высокоширотных областях, когда отсутствует приходящий радиационный поток от Солнца (высокоширотные области в зимний период). В этом

случае любая облачность будет приводить к потеплению из-за уменьшения радиационного выхолаживания в высокоширотных областях.

Рассмотрим проявление работы предложенного механизма и его эффективность в реальной земной атмосфере, для этого проведем анализ результатов наблюдений электрических и термобарических полей тропосферы.

## Влияние изменений электрического поля тропосферы на аэрозоли

Изменения электрического поля в тропосфере будут оказывать воздействие на заряженные частицы в тропосфере и, следовательно, приводить к перераспределению по высоте аэрозолей, которые могут являться ядрами конденсации в атмосфере. Для реально наблюдаемой величины изменений электрического поля в нижней тропосфере (1–3 км)  $\Delta E = 10 \div 100 \text{ В}/\text{м}$ , при этих условиях согласно [11] существенному воздействию будут подвергаться заряженные аэрозольные частицы размером 0,1–0,5 мкм. На рис. 1 приведены плотности распределения концентрации аэрозольных частиц по размерам [13].

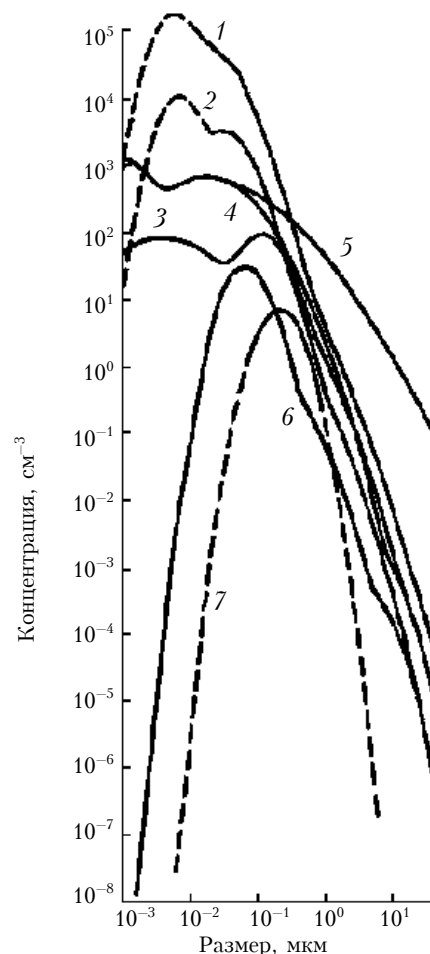


Рис. 1. Распределение концентрации аэрозольных частиц по размерам [13]. Аэрозоли: 1 – городской; 2 – промышленный; 3 – фоновый; 4 – удаленный континентальный; 5 – пылевые бури пустынь; 6 – полярный; 7 – стратосферный

Согласно наблюдаемым данным, приведенным на рис. 1, частицы именно таких размеров соответствуют максимуму в распределении аэрозолей по размерам в атмосфере. Отметим, что частицы аэрозолей такого размера называются метеорологическими, они наиболее активно влияют на процесс конденсации водяного пара в атмосфере [14].

Данные высотных измерений для условий ясной погоды показывают наличие тесной связи между распределением по высоте ядер конденсации и напряженностью электрического поля атмосферы (рис. 2) [15].

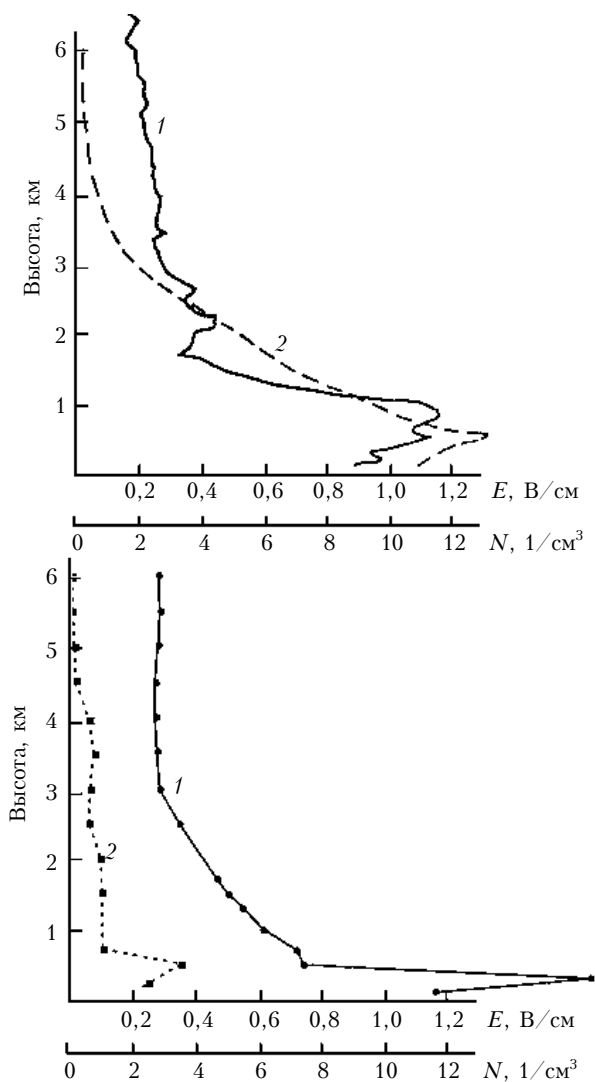


Рис. 2. Высотные распределения ядер конденсации ( $N$  – кривые 2) при изменении электрического поля ( $E$  – кривые 1) [15]

Необходимо учитывать, что и на распределение по высоте ядер конденсации, и на электрическое поле атмосферы оказывают существенное влияние состояние тропосферы и такие метеорологические характеристики, как облачность, ветер, влажность и другие. Поэтому только для условий ясной погоды изменения глобального электрического поля будут с необходимостью приводить к изменению вертикального профиля электрического поля и соответствующему перераспределению по высоте ядер конденсации.

Проявление в тропосфере гелиогеофизических эффектов будет зависеть от времени суток, сезона и состояния атмосферы в данном регионе, а именно: от высотного профиля влагосодержания и температуры, а также от первоначального распределения ядер конденсации по высоте в момент возмущения.

Рассмотрим, как и какие гелиогеофизические характеристики влияют на электрический потенциал ионосфера – Земля, а следовательно, и на распределение ядер конденсации по высоте.

### Влияние солнечных космических лучей и магнитосферных возмущений на атмосферное электричество

В [10] были рассмотрены теоретические аспекты влияния СКЛ на параметры атмосферного электричества. Во время прихода больших потоков солнечных космических лучей, согласно данным измерений в полярных областях, ток ионосфера – Земля возрастает примерно в два раза. На рис. 3 приведены данные измерений атмосферного тока в Апатитах и потока протонов с энергией больше 100 МэВ по данным спутника Геос-10 во время протонного события 15 апреля 2001 г. [16].

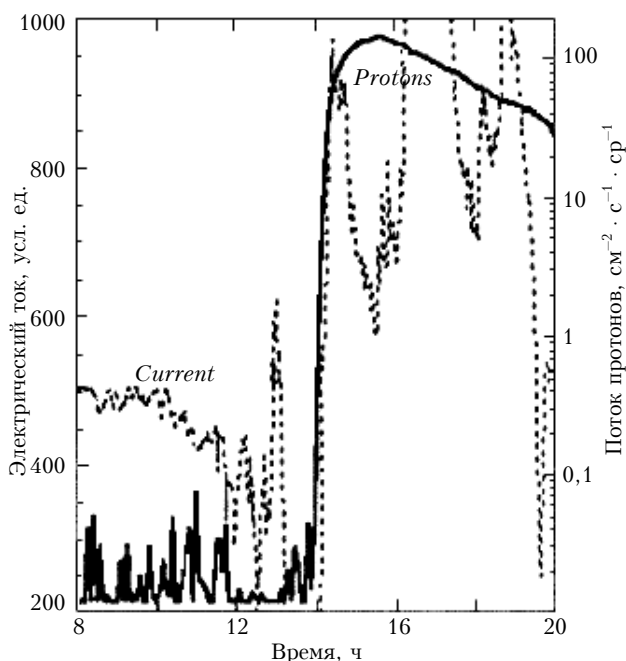


Рис. 3. Изменение плотности тока ионосфера – Земля в полярной области в период возрастания потока солнечных космических лучей 15 апреля 2001 г. [16]

Аналогичные проявления наблюдаются не только на полярных, но и на высокоширотных станциях. В работе [17] по данным измерений параметров атмосферного электричества на высокогорной станции Цугшитце методом наложенных эпох показано, что после солнечных вспышек ток и напряженность электрического поля возрастают в среднем примерно в 1,5 раза (рис. 4).

## Проявления солнечных вспышек в термобарических характеристиках тропосферы

Мощные солнечные вспышки, как правило, сопровождаются генерацией СКЛ и выбросами корональной плазмы, ответственными за геомагнитные возмущения.

После гелиогеофизических возмущений и соответствующих изменений электрического поля высокоширотной атмосферы в первую очередь следует ожидать закономерных изменений вертикального профиля температуры за счет выделения скрытой теплоты (фазовый переход водяного пара) и появления облачности в тех высокоширотных областях, где выполняются соответствующие условия. Появление облачности приводит к изменению радиационного баланса, уменьшению радиационного выхолаживания и изменению термобарического поля тропосферы. При этом температура тропосферы ниже появившейся облачности будет возрастать, а над облачностью понижаться.

Можно оценить изменение температуры в тех областях, где происходит конденсация водяного пара. Для этого предположим, что все тепло, выделяющееся при конденсации водяного пара, расходуется на нагрев воздуха в области конденсации. В этом случае возрастание температуры будет определяться выражением

$$\Delta T = 2,7 \cdot 10^3 (E_v / P) [(\alpha - 100\%) / 100\%],$$

где  $\Delta T$  — изменение температуры;  $E_v$  — упругость насыщающего пара;  $P$  — давление воздуха в области конденсации;  $\alpha$  — степень пресыщения водяного пара в процентах. Для оценок использовались характеристики стандартной атмосферы, а скрытая теплота парообразования считалась равной 500 кал/г, удельная теплоемкость воздуха 0,15 кал/(г·град).

Оценки для уровня 500 гПа показывают, что возрастание температуры на высотах облакообразования составит от 2 до 5 °С, в зависимости от метеорологических условий, таких как высотный профиль влагосодержания и температуры, распределение ядер конденсации по высоте в момент возмущения, в то время как выше облачности температура должна понижаться. Наиболее четко это будет проявляться для ночных условий в высокоширотных областях в зимний период, когда отсутствует приходящий радиационный поток от Солнца.

Таким образом, следует ожидать закономерных изменений температуры в областях формирования облачности как отклик на внешние воздействия. Кроме того, изменение радиационного баланса за счет формирования облачности приведет к более существенному изменению температуры, а следовательно, давления и циркуляции.

На рис. 5 приведены данные измерений вертикального профиля температуры, полученные на obs. Мурманск с 15 по 18 февраля 1984 г. [22] для периода прихода солнечных космических лучей 16 февраля 1984 г. Очевидно, что наблюдаемые изменения высотного профиля температуры полностью соответствуют ожидаемым в соответствии с моделью.

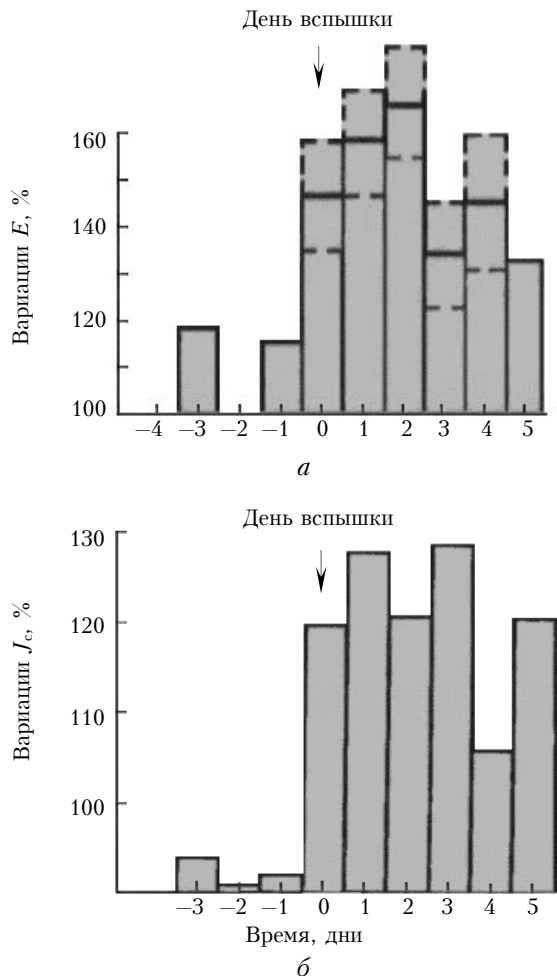


Рис. 4. Изменение параметров атмосферного электричества, полученных на ст. Цугшпитце в периоды солнечных вспышек, которые обработаны методом наложенных эпох относительно моментов солнечных вспышек в линии  $H$  [17]:  $a$  — напряженность электрического поля  $E$ ;  $b$  — плотность тока атмосфера — Земля  $J_c$ . Пунктирными линиями обозначен уровень статистической значимости

Аналогичная реакция в электрическом поле тропосферы в полярных областях наблюдается не только в периоды вторжения солнечных космических лучей, но и во время геомагнитных возмущений [18–21], сопровождающихся усилением магнитосферной конвекции и высыпанием частиц (протонов и электронов) из магнитосферы в высокоширотных областях.

Подчеркнем, что измерения приземного электрического поля и тока ионосфера — Земля соответствуют условиям исключительно так называемой «хорошей» погоды («fair-weather»).

Таким образом, есть три причины, приводящие к существенным изменениям электрического поля в атмосфере полярных широт Земли во время гелиогеофизических возмущений:

- солнечные космические лучи;
- усиления (возмущения) магнитосферной конвекции во время геомагнитных бурь;
- протоны и электроны, высыпаящиеся из магнитосферы во время геомагнитных возмущений.

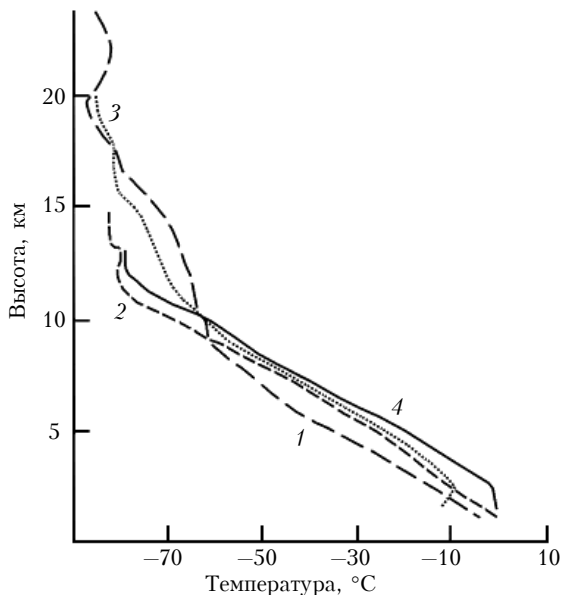


Рис. 5. Изменение вертикального распределения температуры после вторжения СКЛ в высокоширотной области в период 15–18 февраля 1984 г.: 1 – до прихода солнечных космических лучей; 2–4 – после прихода СКЛ

Убедительное подтверждение влияния солнечных вспышек на метеорологические характеристики атмосферы получены также в [23]. Авторами [23] установлено, что после солнечных вспышек наблюдаются изменения давления и температуры над океанами и в прибрежных районах в области широт 40–60°.

На рис. 6 приведены средние разности между температурами на изобарических поверхностях до и после солнечных вспышек над Северной Атлантикой. Максимальное повышение температуры наблюдается на уровне 500 гПа, а на уровне 200 гПа – максимальное понижение.

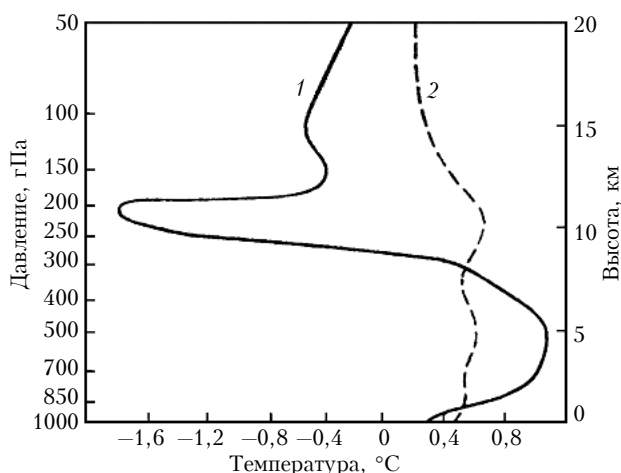


Рис. 6. Изменение высотного распределения температуры после солнечных вспышек [23]: 1 – средние разности между температурами на изобарических поверхностях до и после солнечных вспышек над Северной Атлантикой; 2 – стандартная ошибка среднего

Реакция термобарического поля тропосферы на различные гелиогеофизические возмущения рассматривалась в работах [22–25]. При рассмотрении долговременных связей в качестве индекса солнечной

активности, как правило, используются числа Вольфа (данные непосредственных наблюдений с 1700 г. или восстановленные), для кратковременных – солнечные вспышки и магнитные бури. Обобщение результатов исследований связи между солнечной активностью и метеорологическими явлениями приведены в обзорах (см., например, [1–3]).

В соответствии с предложенным нами электрооптическим механизмом солнечно-земных связей была рассмотрена реакция атмосферного давления для высокоширотных областей на вторжение больших потоков СКЛ [9–12].

Анализ вариаций термобарического поля атмосферы для периодов вторжения аномально больших потоков СКЛ в августе 1972 и в июле 2000 гг. [9–11] показал, что наиболее выраженный отклик наблюдается на высоте уровня 500 гПа в отдельных высокоширотных областях Южного полушария (местная зима) в области широт 50–70°. Максимальная величина эффекта наблюдается на 3-й–5-е сут. В Северном полушарии также наблюдаются аналогичные проявления, однако менее выраженные. В соответствии с [12] изменения уровня изобарической поверхности 500 гПа в обширных высокоширотных зонах происходят синхронно, это значит, что они контролируются гелиогеофизическими факторами, а не естественными синоптическими процессами.

В качестве примера на рис. 7 приведены результаты обработки методом наложенных эпох данных атмосферного давления у поверхности Земли (данные «Реанализа») в период вторжения СКЛ для отдельных наиболее чувствительных областей Северного и Южного полушарий. Очевидно, что наблюдаются совершенно идентичные закономерности в изменении давления для отдельных областей в разных полушариях. Максимальное понижение наблюдается на 5–7-й день после прихода СКЛ.

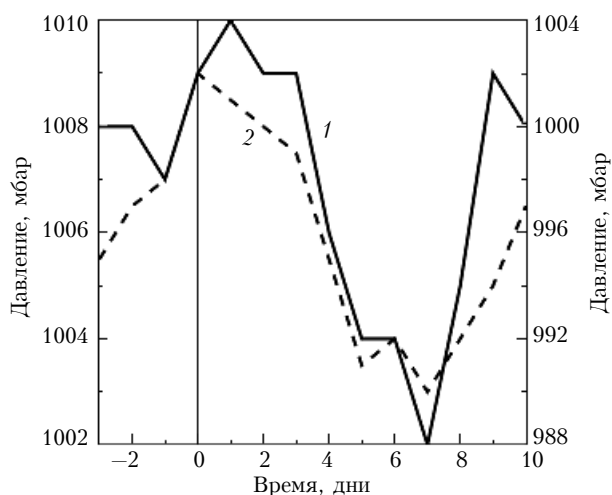


Рис. 7. Изменения атмосферного давления у поверхности Земли после вторжения СКЛ в отдельных областях Северного (1) и Южного (2) полушарий, полученные методом наложенных эпох; 0 – день соответствует моменту прихода СКЛ. Шкала слева – давление в Северном полушарии

В многочисленных работах методом наложенных эпох была показана реакция атмосферного давления на геомагнитные возмущения (см., например, [24]).

В работе [25] установлена связь между ионосферными возмущениями, обнаруживаемыми по авроральным высypаниям (в X-лучах), и изменениями давления на уровне моря над Арктикой (рис. 8).

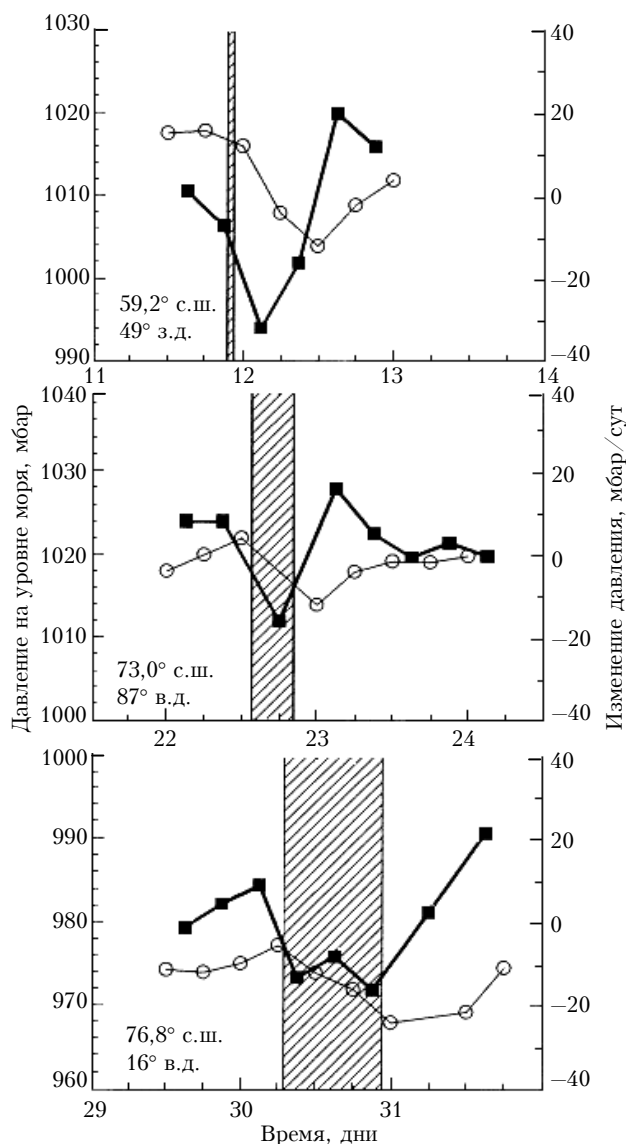


Рис. 8. Связь атмосферного давления с ионосферными возмущениями в январе 2000 г. [25]. ○ — вариации давления на уровне моря, ■ — вариации его производной по времени. Периоды ионосферных возмущений, наблюдаемых в X-лучах, показаны штриховкой

Исследовалось изменение атмосферного давления непосредственно под областью высypания частиц, вызывающих ионосферные возмущения, при этом обращалось внимание на поведение давления перед возмущением. В работе [25] показано, что реакция в атмосферном давлении зависит от первоначальных условий. Однако во всех случаях, за исключением двух очень мощных атмосферных образований, после ионосферных возмущений отмечается понижение атмосферного давления на уровне моря, что находится в полном соответствии с рассматриваемым нами механизмом.

Таким образом, анализ данные наблюдений, относящихся к различным блокам электрооптического

механизма для реальной атмосферы, полностью подтверждает его адекватность и позволяет обобщить это в виде модели гелиоклиматических связей.

## Модель воздействия солнечной активности на тропосферу Земли

На рис. 9 приведена блок-схема модели воздействия солнечной активности на климатическую систему Земли, которая основана на изложенном выше механизме влияния гелиогеофизических факторов на электрическое поле, радиационный баланс и термобарическое поле земной тропосферы в полярных областях.

Как показано выше, можно выделить три причины изменения электрического потенциала ионосфера — Земля.

Изменение электрического потенциала на высоких широтах приводит к соответствующему изменению напряженности электрического поля в тропосфере и перераспределению заряженных аэрозолей по высоте. В тех областях, где электрический потенциал увеличивается, происходит подъем отрицательно заряженных аэрозолей на большие высоты и, следовательно, возрастает их концентрация на высотах облакообразования.

Таким образом, любой из вышеуказанных факторов будет влиять на процессы формирования облачности в соответствующих областях полярной тропосферы. При формировании облачности, во время фазового перехода водяного пара, будет происходить выделение скрытого тепла, т.е. должна несколько возрастет температура.

Электрооптический механизм наиболее эффективно работает в высокоширотных областях (в зоне аврорального овала в период магнитосферных возмущений и в области полярной «шапки» во время вторжения СКЛ), приводя к дополнительному формированию облачности (в областях, где имеется достаточная концентрация водяного пара) над океанами в прибрежных районах.

Формирование облачности приводит к изменению радиационного баланса в высокоширотных областях. При наличии излучения, приходящего от Солнца (местное лето, светлое время суток), влияние облачности на радиационный баланс является достаточно сложным и существенно зависит от типа облачности.

В темное время суток или полярной ночью любая облачность будет приводить к возрастанию температуры ниже облачности и понижению выше вследствие уменьшения радиационного выхолаживания, которое является наиболее существенной составляющей радиационного баланса в этот период.

Таким образом, при возрастании уровня солнечной активности, в результате работы указанного выше механизма, происходит уменьшение потерь энергии климатической системой Земли в основном в высокоширотных областях.

Вследствие этого изменится высотный профиль температуры, что приведет к изменению общей циркуляции и уменьшению оттока тепла из среднеширотных и приэкваториальных областей. В результате



Рис. 9. Схематическое представление модели

перестройки как локальной, так и общей циркуляции атмосферы в свою очередь изменится термобарическое поле тропосферы в глобальном масштабе.

Так как в полярных областях имеются значительные запасы льда, то можно ожидать качественно (количественно – необходимы расчеты в рамках глобальной климатической модели), что значительная часть «сохраненного» тепла будет затрачиваться на фазовый переход (таяние льда), при незначительном повышении приземной температуры воздуха. (В то время как уменьшение оттока тепла в средних широтах может привести к заметному увеличению приземной температуры воздуха средних широт, особенно на континентах).

Таким образом, в продолжительные периоды с высоким уровнем солнечной активности, в результате работы указанного выше механизма, происходят уменьшение потерь энергии климатической системой Земли и увеличение теплосодержания земной климатической системы.

В соответствии с предложенной моделью при возрастании уровня солнечной активности будет происходить увеличение температуры, причем наиболее существенно будет возрастать температура в высокоширотных областях. Кроме того, данная модель предсказывает, что температура в ночное время бу-

дет возрастать сильнее, чем в дневное. В результате этого при увеличении (возрастании) уровня солнечной активности будет уменьшаться как суточный, так и годовой ход температуры, причем это уменьшение будет наиболее выражено в высокоширотных областях.

В продолжительные периоды низкой солнечной активности (более 10 лет) будет происходить противоположный процесс – увеличение радиационного выхолаживания в полярных областях и соответствующее уменьшение теплосодержания земной климатической системы. Следует отметить, что расчеты эффектов проявлений солнечной активности в изменениях глобальной температуры необходимо проводить в рамках глобальной климатической модели. Значительное стабилизирующее влияние оказывают океан (инерционность) и запасы льда Арктики и Антарктики.

### **Роль электрооптического механизма в изменении энергосодержания земной климатической системы**

Оценим эффективность данного механизма (в рамках предложенной модели) в изменении энер-

госодержания 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:

$$\Delta Q = (e_0\uparrow - e_1\uparrow)SK_1K_2, \quad (1)$$

где  $\Delta Q$  – общее изменение радиационных потерь;  $e_0\uparrow$  – уходящее тепловое излучение Земли и атмосферы (плотность потока энергии), теряемой системой в отсутствие облачности;  $e_1\uparrow$  – то же при наличии облачности;  $S$  – эффективная площадь, над которой реализуется механизм.

Введем поправочные коэффициенты, ограничивающие время и место действия гелиогеофизических факторов, которые учитывают:

- площадь (долгота и широта);
- «благоприятное» состояние атмосферы;
- длительность воздействия возмущающих факторов:

$K_1$  – коэффициент, отражающий вероятность присутствия внешнего воздействия (периоды повышенной геомагнитной активности и прихода СКЛ ( $K_1 = 0,3$ , интервал изменений  $K_1 - 0,05 \div 0,6$ );  $K_2$  – коэффициент, отражающий вероятность того, что условия в атмосфере «благоприятны» для проявления механизма ( $K_2 = 0,3$ , интервал изменений  $K_2 - 0,2 \div 0,6$ );

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

где  $R_E$  – радиус Земли;  $\varphi$  – широта;  $K_3$  – коэффициент, отражающий долю площади по долготе, чувствительную к внешним воздействиям ( $K_3 = 0,3$ , интервал изменений  $K_3 - 0,2 \div 0,4$ ).

Согласно данным актинометрического радиозондирования в Антарктиде [26], эффективное излучение на уровне тропопаузы при облачных условиях составляет 60–70% от таких же величин при ясном небе, а  $e_0 - e_1 - 45-65$  Вт/м<sup>2</sup>. 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 равна  $(1-2) \cdot 10^{14}$  Вт и соответствует скорости потепления 0,2–0,4 Вт/м<sup>2</sup> для всей земной поверхности. Указанная величина есть оценка возможного «энергосберегающего ресурса» за счет солнечной переменности. 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 работе [27] приведены данные об изменении теплосодержания земной климатической системы между 1955 и 1996 гг., при этом учтены 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 40 лет  $Q_{\Sigma}$  составляет  $2 \cdot 10^{23}$  Дж. Если предположить, что эти изменения происходили равномерно за рассматриваемый интервал времени, скорость изменения теплосодержания или мощность источника, который обеспечивал изменения теплосодержания:

$$W = Q_{\Sigma}/t = 2 \cdot 10^{23}/1,26 \cdot 10^9 = 1,6 \cdot 10^{14} \text{ Вт},$$

что соответствует скорости потепления 0,3 Вт/м<sup>2</sup> для всей поверхности Земли.

Таким образом, оказывается, что наблюдаемая величина изменения энергосодержания земной климатической системы в XX в. соответствует приведенным выше оценкам возможного вклада солнечной переменности посредством рассмотренного механизма.

Подчеркнем, что за рассматриваемый промежуток времени наблюдались лишь квазипериодические вариации солнечной постоянной, а значимый тренд отсутствовал. Это позволяет сделать вывод, что наблюдаемые изменения теплосодержания земной климатической системы 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 наблюдаемыми изменениями климатической системы в XX в.

## Выводы

Предложен и обоснован физический механизм влияния солнечной активности на погоду и климат, который сводится к регулированию (модуляции) потока энергии, уходящего от Земли в космос в высокоширотных областях. Это своего рода клапан, определяющий условия радиационного баланса в атмосфере высоких широт. Радиационный баланс полярных областей зависит от уровня гелиогеофизической активности, который оказывает значительное влияние на вертикальный электрический ток и потенциал ионосфера – Земля.

Установлены три причины, которые приводят к существенным изменениям электрического поля в атмосфере полярных широт Земли во время гелиогеофизических возмущений: 1) СКЛ; 2) частицы, высыпавшиеся из радиационных поясов; 3) возмущения магнитосферной конвекции.

Дана количественная оценка вклада солнечной активности в изменение теплосодержания земной климатической системы в рамках рассмотренного механизма. Показано, что в рамках этого механизма естественным образом можно объяснить климатические



аномалии в прошлом тысячелетии, а также значительную часть глобального потепления в XX в.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 30.

1. *Солнечно-земные связи, погода и климат* / Под ред. Б. Мак-Нормана и Т. Селлиги. М.: Мир, 1982. 382 с.
2. *Герман Дж.Р., Голдберг Р.А.* Солнце, погода и климат. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 319 с.
3. *Авдюшин С.И., Данилов А.Д.* Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // Геомагнетизм и аэрон. 2000. Т. 40. № 5. С. 3–14.
4. *Douglass D.H., Clader B.D.* Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 33–1–33–4.
5. *Cubasch U.* Sun, Man, and Climate // *Max Planck Research, Science Magazine of the Max Planck Society*, 2002. V. 1. B56133. P. 78–83.
6. *Ring D.* The Sun's role in climate variations // *Science*. 2002. V. 296. P. 673–677.
7. *Fröhlich C., Lean J.* The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976 // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 4377–4380.
8. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* Климат как проблема физики // *Успехи физ. наук*. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.
9. *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 // 35<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, 18–25 July 2004. Paris, France. Abstract COSPAR04-A-01117.
10. *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Шаманский Ю.В.* Влияние гелиогеофизических факторов на электрические характеристики атмосферы // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству. Владимир, 2003: Сб. науч. трудов. 2003. Т. 1. С. 43–46.
11. *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И.* Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности // *Оптика атмосф. и океана*. 2004. Т. 17. № 12. С. 1003–1017.
12. *Коваленко В.А.* Солнечная переменность и климат Земли // Мат-лы Байкальской международной молодежной научной школы по фундаментальной физике. Иркутск, 2003. С. 16–24.
13. *Облака и облачная атмосфера: Справочник.* Л.: Гидрометеониздат, 1989. 447 с.
14. *Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1978. Т. 2. С. 25.
15. *Имянитов И.М., Чубарина Е.В.* Электричество свободной атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1965. 240 с.
16. *Ролдугин В.К., Белоглазов М.И., Галахов А.А., Першаков Л.А., Шишаев В.А.* О наблюдениях атмосферного электричества на Кольском полуострове // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству. Владимир, 2003: Сб. науч. трудов. 2003. Т. 1. С. 43–46.
17. *Reiter R.* Atmospheric electricity activities of the institute for atmospheric environmental research // *Proc. of the Fifth International Conf. on Atmosph. electricity*. Garmisch-Partenkirchen. Germany, 2–7 September 1974. Darmstadt: Steinkopff, 1977. P. 759–796.
18. *Gurnet D.A., Frank L.A.* Observed relationships between electric fields and aurora particle precipitation // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. P. 145–154.
19. *Sheftel V.M., Bandilet O.I., Yaroshenko A.N., Chernychev A.K.* Space-time structure and reasons of global, regional, and local variations of atmospheric electricity // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 10797–10806.
20. *Michnowski S.* Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 13939–13948.
21. *Rycroft M.J., Israelsson S., Price C.* The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.* 2000. V. 62. P. 1563–1576.
22. *Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Henriksen K., Vasheynyuk E.V.* Enhancement of stratospheric after solar proton event // *Ann. Geophys.* 1996. V. 14. P. 1119–1123.
23. *Schuermans C.J.E., Oort A.H.* A statistical study of pressure changes in the troposphere and lower stratosphere after strong solar flares // *Pure and Appl. Geophys.* 1969. V. 75. P. 233–246.
24. *Мустель Э.Э., Мулюкова Н.Б., Чертопруд В.Е.* О солнечно-тропосферном эффекте в северном и южном полушариях Земли: Научн. информ. 1990. Вып. 68. Рига. С. 99–117.
25. *Toth L., Szegedi S.* Relationships between ionospheric disturbances and charges of sea level pressure over the arctic // *Proc. of The 1 Solar and Space Weather Euro-conference, The Solar Cycle and Terrestrial Climate*. 25–29 September 2000, Santa Cruz de Tenerife, Tenerife. Spain. P. 529–531.
26. *Зайцева Н.А., Шляхов В.И.* Длинноволновая радиация в атмосфере Антарктиды // *Исследование климата Антарктиды*. Л.: Гидрометеониздат, 1980. С. 27–33.
27. *Levitus S., Antonov J.I., Boyer P.T., Stephens C.* Warming of the World Ocean // *Science*. 2000. V. 287. N 5461. P. 2225–2229.

**G.A. Zherebtsov, V.A. Kovalenko, S.I. Molodykh, O.A. Rubtsova. Model of solar activity action on climatic characteristics of the Earth troposphere.**

The problems of fundamental importance for understanding and estimation of possible role of solar activity in past and future climatic variations are discussed. A particular attention is paid to mechanism of solar activity influence on climatic characteristics of atmosphere through tropospheric electricity. Main causes of significant variations of electric field in the atmosphere of the Earth polar latitudes during helio-geophysical disturbances are under analysis: solar cosmic rays, protons and electrons falling from the magnetosphere during geomagnetic disturbances, acceleration (disturbances) of magnetospheric convection in the time of geomagnetic disturbances. In the framework of the author's model, the results of investigation of solar bursts and interplanetary magnetic field structure influence on thermobaric characteristics of troposphere are systematized and generalized.