



УДК 551.58:551.590.21

Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения

Г. А. Жеребцов (gzrb@iszf.irk.ru)

В. А. Коваленко (vak@iszf.irk.ru)

С. И. Молодых (sim@iszf.irk.ru)

О. А. Рубцова (olga@iszf.irk.ru)

Аннотация. 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 переменности 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. Анализируются основные причины, которые приводят к существенным изменениям электрического поля в атмосфере полярных широт Земли во время гелиогеофизических возмущений: солнечные космические лучи; потоки заряженных частиц, высыпающих из магнитосферы во время геомагнитных возмущений; усиления магнитосферной конвекции во время геомагнитных бурь.

Ключевые слова: климатическая система, климат, погода, солнечная активность.

Введение

В последнее десятилетие проблеме изменений глобального климата и их прогнозам уделяется особое внимание. Это связано с тем, что наблюдаемое в XX в. глобальное потепление (ГП) оказывает значительное влияние на климатически обусловленные природные ресурсы. К ним в первую очередь относятся те отрасли экономики, которые тесно связаны с состоянием погоды и климата. Изменение климата оказывает огромное влияние на деятельность человека, сельское хозяйство, транспорт, экономику и окружающую среду в целом. В связи с этим крайне важно ответить на вопрос, какова его природа. Ответ на этот вопрос имеет не только теоретическое, но и прикладное значение. Вопрос, в какой мере глобальное потепление в последние десятилетия имеет антропогенное происхождение – в противоположность естественному происхождению (например, за счет солнечной активности, вследствие естественной изменчивости глобальной климатической системы, вулканической деятельности и др.), имеет перво-

степенное 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.

Главное в проблеме 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 особенно 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 главных 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 неопределенность связана с неадекватностью учета интерактивных процессов в системе «аэрозоль – облака – радиация», а также взаимодействий в системе «атмосфера – гидросфера – криосфера» [1]. Усиление парникового эффекта атмосферы, обусловленное предполагаемым удвоением концентрации CO_2 в атмосфере, может составить около 4 Вт/м^2 , в то время как неопределенности, связанные с количественной оценкой роли атмосферного аэрозоля и облаков, при численном моделировании климата, достигают $10\text{--}15 \text{ Вт/м}^2$ [1, 2]. Именно поэтому результаты расчетов количественного вклада CO_2 в наблюдаемое и прогнозируемое глобальное потепление на основе современных климатических моделей за счет увеличения содержания CO_2 , обусловленного человеческой деятельностью, различаются в несколько раз (от 1 до 5 градусов) [1–3].

Это не позволяет сделать однозначный вывод о том, что потепление в XX в. обусловлено исключительно антропогенными факторами и тем более утверждать, что *только* CO_2 является ответственным за наблюдаемое глобальное потепление.

Тем не менее, межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 4-м оценочном докладе (IPCC, 2007) сделала вывод о том, что большая часть увеличения средней глобальной температуры во второй половине XX в. с высокой вероятностью связана с антропогенным увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере. Однако известно, что это не единственный фактор, влияющий на климат. Наблюдаемые корреляции долговременных изменений глобальной температуры (ГТ) и содержания CO_2 не означают, что причиной увеличения ГТ является возрастание концентрации CO_2 , так как увеличение температуры океана (которое реально наблюдается) также приводит к увеличению содержания CO_2 в атмосфере, т. е. изменение содержания CO_2 может являться следствием, а не причиной ГТ [4]. Вместе с тем наиболее весомым и обоснованным аргументом, который заставляет сомневаться в том, что наблюдаемое ГТ обусловлено только вкладом CO_2 антропогенного происхождения, яв-

ляется отсутствие ответа на вопрос, каковы причины существования теплых и холодных периодов в прошлом тысячелетии и увеличение глобальной приземной температуры на $0,5^\circ$ в период с 1890 по 1940 гг., когда вклад CO_2 антропогенного происхождения был незначителен. Кроме того, чем объяснить понижения глобальной температуры Северного полушария в период 1940–1970 гг., в то время как антропогенные выбросы CO_2 в атмосферу в этот период непрерывно возрастали. Отметим, что в этот период солнечная активность также возрастала. Очевидно, что природа этого похолодания обусловлена исключительно естественными изменениями климатической системы.

Наиболее весомым аргументом, по мнению сторонников антропогенной природы глобального потепления в XX в., является скорость роста приземной температуры воздуха. Они считают ее «беспрецедентно» большой ($0,7^\circ/100$ лет) и что ранее такого не наблюдалось. В связи с этим особый интерес представляет анализ быстрых колебаний климата в прошлом, основанный на эмпирических данных (ледниковые, дендроклиматические и др.).

Изменение климата в прошлом

Колебания климата в прошлом происходили внезапно, временами вступая в ледниковую фазу или фазу межледникового потепления. Не касаясь природы этих изменений, рассмотрим эмпирические данные с высокой степенью временного разрешения (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, обобщенные результаты приведены в работе [5]. 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, во время которых изменение глобальной температуры составляло не менее $1,5^\circ\text{C}$ за 100 лет. Наиболее значительное потепление соответствует переходу от похолодания позднего дриаса (10,3–10,5 тыс. лет тому назад) к потеплению раннего голоцена, когда температура воздуха на высоких широтах возросла на $5\text{--}7^\circ$ за несколько десятков лет. Кроме того, была обнаружена связь между изменениями содержания 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 [6].

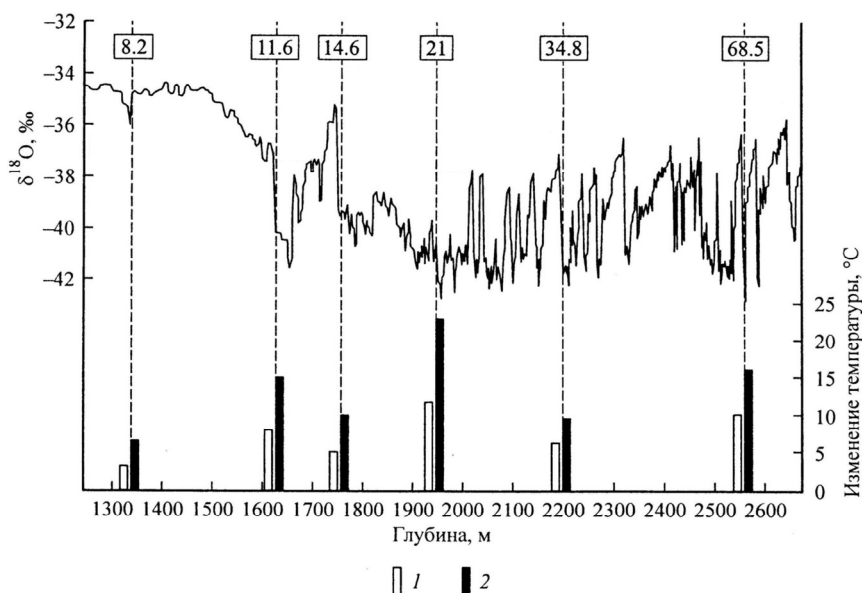


Рис. 1. Изменения температуры воздуха (1 и 2, °С), полученные по кислородно-изотопному составу льда (1) и по изотопному составу азота и аргона (2) в ледниковом керне Саммит за последние 70 тыс. лет [6]

На рис. 1 представлены оценки изменения температуры воздуха для разных климатических событий в последние 70 тыс. лет, полученные по соотношению изотопов кислорода, азота и аргона в ледовом керне Саммит [5,6]. Самая низкая температура воздуха за этот период соответствует максимальной фазе вюрмского оледенения около 21 тыс. лет тому назад. Изменения температур, определенные по изотопному составу азота и аргона, вдвое превышают соответствующие оценки изменения температур, полученные по кислородно-изотопному составу льда. Очевидно, что максимально быстрые увеличения температуры наблюдались 11,6 и 14,6 тыс. лет тому назад. Важной особенностью наблюдаемых изменений температуры является асимметричный характер этих изменений. Длительные периоды (сотни и тысячи лет), понижения температуры (неоднородный характер) сменялись быстрыми (десятки лет) потеплениями. Датировка климатических событий прошлого с использованием различных временных шкал [6, 7] позволила выявить изменения климатических характеристик с временным разрешением около 20 лет. Наиболее быстрые увеличения температуры воздуха наблюдались между 14,6 и 14,5 тыс. календарных лет тому назад. Менее чем за 100 лет температура воздуха высоких широт Северного полушария возросла на $9 \pm 3^\circ \text{C}$. По данным гренландских кернов температура воздуха на границе 11,6 тыс. лет тому назад могла повыситься на $7\text{--}8^\circ \text{C}$ за период 30–50 лет [8].

Скорость изменения летних температур воздуха в средних широтах Северного полушария (Британия, Западная Европа) по палеоботаническим

и палеонтологическим данным, составляла не менее 2,6 °С за 100 лет для потепления на границе 14,6 тыс. лет тому назад и около 1,7 °С за 100 лет на границе 11,6 тыс. лет тому назад. [9]. Особый интерес представляют результаты реконструкции климата Британских островов, выполненные по ископаемой фауне жуков [9], которые показали, что увеличение среднегодовой температуры воздуха на границе позднего гляциала и позднеледникового составило не менее 10 °С. Этому повышению температуры соответствовало увеличение концентрации метана в атмосфере, с запаздыванием примерно на 30 лет, которое обусловлено таянием вечной мерзлоты и изменением процессов аэрации в верхних слоях мерзлотных грунтов в тундре и лесотундре.

Таким образом, анализ временных изменений температуры воздуха в прошлом [5–9], 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. 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 [5] установлено, что изменения температуры воздуха имеют практически синхронный ход с изменениями концентрации парниковых газов CO_2 и CH_4 . Быстрые повышения температуры воздуха сопровождались быстрым ростом концентрации углекислого газа и метана, которые совместно с водяным паром определяют парниковый эффект. Анализ временных сдвигов вариаций температуры и содержания парниковых газов в атмосфере с целью оценки причинно-следственных связей в естественных долгопериодных процессах земной климатической системы для сопоставления с оценками соответствующих связей при современных изменениях проведен в работе [10]. Получено, что для короткопериодных вариаций наблюдаются эффекты опережения вариаций температуры изменениям 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 демонстрирует большое сходство в их поведении. Исторические данные показывают, что наблюдаемые значимые изменения климата могут быть обусловлены солнечной переменностью. В частности, есть основания считать, что именно с вариациями солнечной активности были связаны периоды похолоданий и потеплений, по крайней мере, в предыдущем тысячелетии. Долговременные изменения солнечной активности в сопоставлении с климатическими характеристиками планеты показаны на рис. 2 [11].

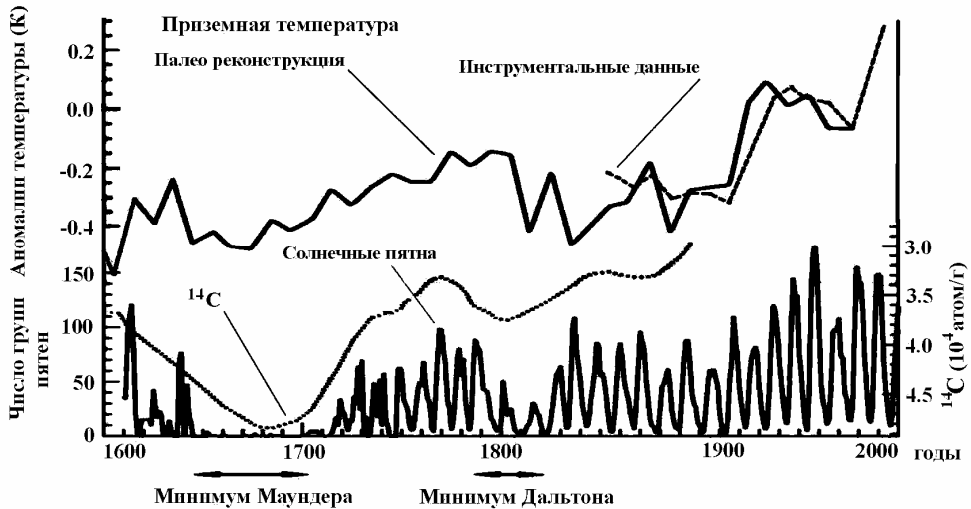


Рис. 2. Долговременные изменения температуры воздуха и солнечной активности по непосредственным и косвенным данным наблюдений (на основе данных из [11])

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 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, вносит ли солнечная активность значимый вклад в изменение климата, до сих пор остается дискуссионным.

В серии работ [12–20] солнечная переменность рассматривается в качестве одной из важных причин глобального потепления.

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 про-

явления связей на коротких временных интервалах носят статистический характер.

3. При исследовании влияния солнечной переменности на погоду и климат возникают трудности выделения 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 %, рис. 3 [21]. Именно данная характеристика включается во все численные климатические модели. В связи с этим многие климатологи решительно отвергают саму возможность воздействия солнечной активности на климат.

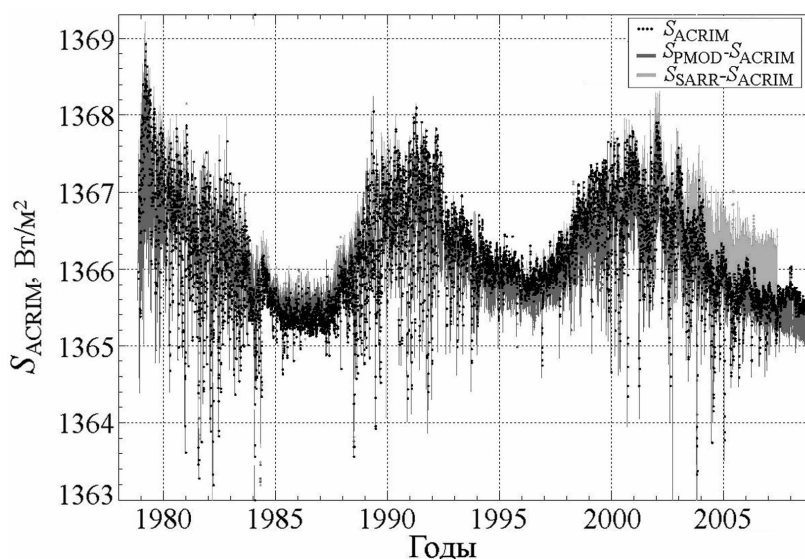


Рис. 3. Полный поток излучения Солнца в шкалах «ACRIM» и «PMOD» [16]

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 также 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 [10] также показывают, что изменения солнечной постоянной не могут внести значимый вклад в наблюдаемые вариации глобальной температуры. В то же время в рамках эмпирических моделей [17–20] 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 значимо, 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, поступающего в земную атмосферу и уходящего в космос. Таким образом, не менее важным, а скорее всего первостепенным является вопрос об изменениях потока энергии излучаемого Землей и атмосферой в космос и ключевая роль в регулировании этого потока принадлежит облачности и малым составляющим, в частности, таким как H_2O , CO_2 , O_3 , метан и др.

Механизмы влияния солнечной активности на погодно-климатические характеристики

В последнее время широко обсуждаются механизмы влияния солнечной активности на погоду и климат через космические лучи. Так как поток и спектр космических лучей модулируются межпланетным магнитным полем, которое контролируется солнечной активностью, космические лучи могут представлять одно из связующих звеньев между изменениями солнечной активности и глобальным климатом. На возможность изменения альбедо за счет вариаций облачности, обусловленных вариациями потока галактических космических лучей (ГКЛ), указывалось в работе [22].

Экспериментальные данные по связи космических лучей с облачностью для средних широт достаточно противоречивы, и эта гипотеза не получила пока сколько-нибудь убедительного подтверждения с точки зрения реальных количественных оценок [23]. Кроме того, следует отметить неоднозначность влияния облачности на климат. Известно, что облачность и количество водяного пара в земной атмосфере играют определяющую роль в энергетическом балансе земной климатической системы. Влияние облачности на температурный режим атмосферы определяется двумя противоположными эффектами – отражением коротковолнового и поглощением длинноволнового излучения. Преобладает точка зрения, что увеличение нижней облачности приводит к охлаждению атмосферы, а увеличение верхней облачности – нагреву. Кроме того, следует отметить, что увеличение любой облачности в полярных областях к в холодный период будет приводить к потеплению, так как приходящий коротковолновый поток на

высокие широты в этот период значительно меньший, чем уходящий длинноволновый.

Существенно иной физический механизм влияния солнечной активности на климатические характеристики и циркуляцию атмосферы предложен в работах авторов [15–17]. Сущность механизма сводится к регулированию потока энергии, уходящего от Земли в космос, за счет изменения условий радиационного выхолаживания в атмосфере высоких широт. Механизм заключается в том, что на высотное распределение в тропосфере заряженных ядер конденсации оказывает влияние вертикальный электрический потенциал ионосфера–Земля. В периоды низкого уровня солнечной и геомагнитной активности этот потенциал определяется в основном тропическими грозами и интенсивностью галактических космических лучей. В периоды гелиогеофизических возмущений в высоких широтах значительный вклад в потенциал ионосфера–Земля вносят возмущенная магнитосферная конвекция, потоки заряженных частиц, высыпающиеся из радиационных поясов и солнечные космические лучи СКЛ [15]. Перераспределение ядер конденсации по высоте при увеличении электрического поля атмосферы может приводить к конденсации водяного пара в областях, где ранее концентрация этих ядер была мала, а содержание водяного пара достаточно. Это сопровождается изменением суммарной скрытой теплоты (фазовый переход водяного пара) и появлением облачности. Появление облачности приводит к изменению радиационного баланса, уменьшению радиационного выхолаживания и изменению термобарического поля тропосферы.

Проявление в тропосфере гелиогеофизических возмущений будет зависеть от времени суток, сезона и состояния атмосферы в данном регионе, а именно:

- а) высотного профиля влагосодержания и температуры;
- б) первоначального распределения ядер конденсации по высоте в момент возмущения;
- в) вертикального турбулентного перемешивания.

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.

Модель воздействия солнечной активности на тропосферу

В работе [16] на основе описанного выше механизма [15] была предложена физическая модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли. Ключевая концепция модели – влияние гелиогеофизических возмущений (ГВ) на параметры земной климатической системы, управляющие потоком энергии, уходящей от Земли в космос в высокоширотных областях. Величина энергии, необходимая

для регулирования этого потока, может быть достаточно малой и не имеет 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 электрического поля высокоширотной атмосферы. Кроме того, определенный вклад в изменение электрического поля высокоширотной тропосферы вносят большие потоки солнечных космических лучей (СКЛ), генерируемые во время солнечных вспышек. Наиболее эффективно это влияние проявляется в высокоширотных 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 высокоширотных областей, увеличение 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 низкоширотных областей, что приведет к увеличению 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, выделение скрытого тепла приводят лишь к незначительному увеличению температуры в областях формирования облачности. Наиболее важным и принципиальным в предложенной модели является последующее изменение радиационного баланса.

Исходя из данной модели [16] следует ожидать следующие особенности отклика атмосферы на воздействие солнечной активности:

1. Максимального отклика следует ожидать в высокоширотных 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 местной зимой, когда мал или отсутствует приходящий коротковолновый поток.

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 суток 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 работе [17; 20] 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. 4 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 Dst , которые приведены на рис. 4. В качестве реперной даты (0-й день) выбран день прихода потока СКЛ.

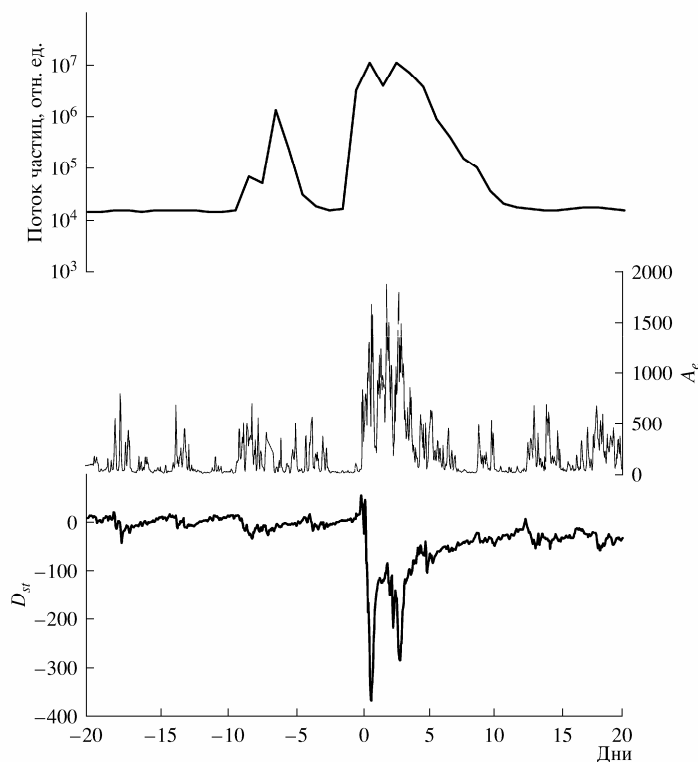


Рис. 4. Характеристики гелиогеофизического возмущения
 а) поток солнечных космических лучей, б) индекс AE, в) индекс Dst.
 По горизонтальной оси отложено время относительно начала ГГВ

Последовательные изменения высотного профиля отклонений температуры воздуха от дня, предшествующего началу ГГВ (-1-й день) в области «стабионирования» (55–65 N, 205–215 E) в период с 7.XI.2004 г. по 12.XI.2004 г., приведены на рис. 5. 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 стабионирования наблюдается на 4-й день в слое 500–700 гПа.

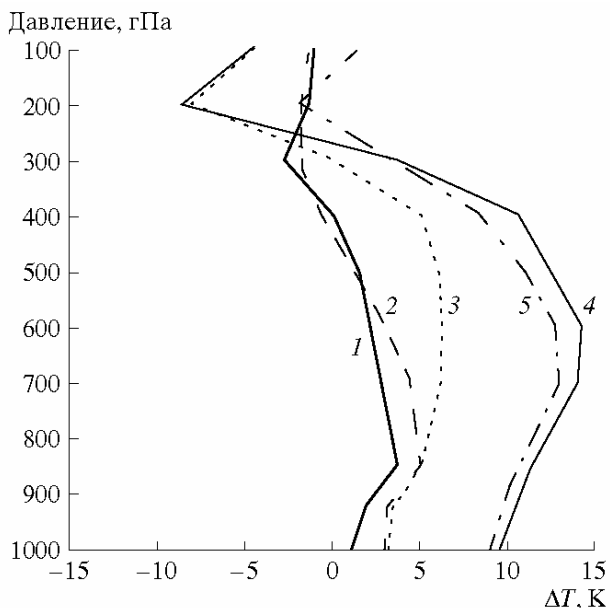


Рис. 5. Высотный профиль отклонений температуры воздуха от дня, предшествующего началу ГГВ в области «стабионирования» в период с 7.XI.2004 г. по 12.XI.2004 г. в области (55–65°N, 145–155°W): 1 – 0-й день (день ГГВ), 2–5 – соответственно первый, второй, четвертый и шестой день после начала ГГВ

Этот случай соответствует суммарному воздействию двух составляющих гелиогеофизического возмущения, которые оказывают влияние на электрическое поле высокоширотной тропосферы – потока 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 ГГВ, показал, что наблюдается возрастание теплосодержания нижней и средней тропосферы, которое может достигать нескольких процентов от амплитуды сезонного хода [20].

Долговременные изменения температуры в тропосфере

Рассмотрим сценарий возможного вклада солнечной активности в наблюдаемые климатические изменения в XX в. в соответствии с рассмотренной моделью. Подчеркнем, что практически во всех численных клима-

тических моделях влияние солнечной активности включается через прямое воздействие (изменение солнечного излучения примерно на 0,1 %) на тропосферу [10], которое, на наш взгляд, не может дать значимый вклад в изменение климата Земли.

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 высокоширотных областях приводят к соответствующим изменениям меридионального градиента температуры, что сопровождается изменением циркуляции и оттока тепла от низкоширотных областей. Таким образом, изменения потерь в высокоширотных областях оказывают влияние на теплосодержание земной климатической системы и климат.

В предложенной нами модели основными проявлениями солнечной активности, оказывающими влияние на погодно-климатические характеристики тропосферы, являются солнечные космические лучи и параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, которые определяют геомагнитную активность. Следует отметить, что долговременные вариации геомагнитной возмущенности, сглаженные по 11-летним циклам, достаточно хорошо коррелируют с числом солнечных пятен. Однако в пределах отдельных 11-летних солнечных циклов связь неустойчива. Кроме того, следует обратить особое внимание на очень важную, на наш взгляд, особенность в долговременных изменениях геомагнитной активности: начиная с 1900 г. и вплоть до 1960 г. наблюдалось возрастание минимальных значений геомагнитной активности, в то время как минимальные значения уровня солнечной активности, оцениваемые по числам Вольфа, практически не изменяются в течение всего наблюдаемого периода. При этом минимальные значения уровня геомагнитной активности во второй половине XX в. достигли максимальных – в первой половине. Это наглядно можно видеть из данных, представленных на рис. 6.

С начала XX в. геомагнитная активность непрерывно возрастает с некоторым «провалом» в период 1965–1975 гг. и последующим ростом вплоть до 2000 г. На фоне этих долговременных изменений наблюдаются вариации с квазидвадцатилетним периодом. Если предложенная модель реалистична и правильно описывает основные физические процессы в земной климатической системе, то следует ожидать определенных закономерностей в изменении климатических характеристик, вследствие вариаций геомагнитной активности. В соответствии с этой моделью возрастание геомагнитной активности с начала XX в. должно приводить к уменьшению радиационного выхолаживания и соответствующему возрастанию температуры в высокоширотных областях, с некоторым запаздыванием из-за тепловой инерции.

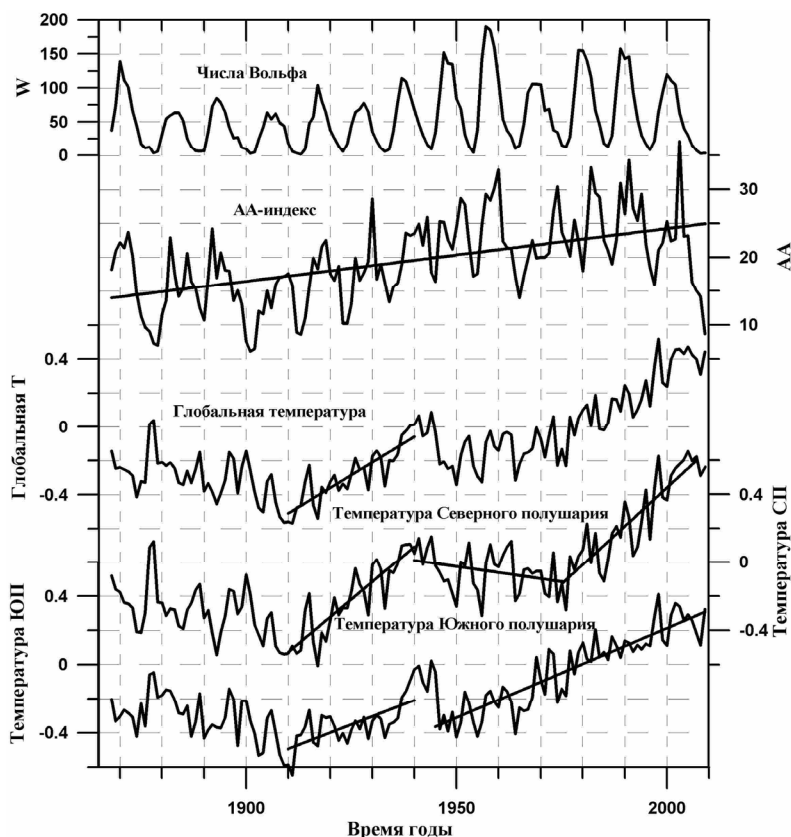


Рис. 6. Среднегодовые значения солнечной (W), геомагнитной (AA индекс) активностей и аномалий приземной температуры воздуха: глобальной, Северного и Южного полушарий

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 $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 гг. и с 1977–2000 г., а после 2000 г., как видно на рис. 6, 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 высокоширотных и среднеширотных областях наблюдалось в основном в холодный период года [20]. В соответствии с климатическими моделями, которые включают как естественные, так и антропогенные факторы, проявление потепления с широтой значительно различается. 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 [1; 3; 4]. В соответствии с предложенной нами моделью закономерности противоположны, т. е. в первую очередь должно наблюдаться потепление в высоких широтах с последующим распространением к низким широтам [17; 20]. Кроме того, максимальный рост температуры воздуха должен наблюдаться в холодный период года, когда в полярных областях мал или отсутствует проходящий коротковолновый поток солнечной радиации, и появление любой облачности будет приводить к уменьшению радиационного выхолаживания тропосферы ниже уровня облакообразования, т. е. к потеплению.

На рис. 7 приведены изменения приземной температуры воздуха в различных широтных зонах Северного полушария за период 1948–2006 гг. в холодный и теплый периоды.

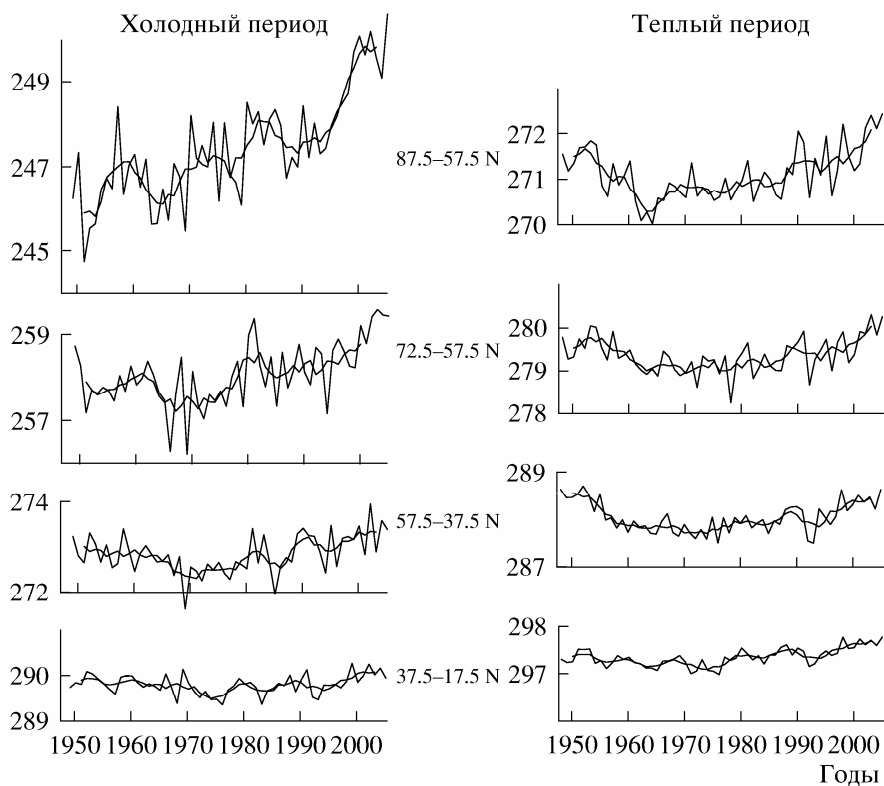


Рис. 7. Изменения приземной температуры воздуха в различных широтных зонах северного полушария в теплый и холодный периоды по данным NCEP/NCAR reanalysis [20]

Потепление во второй половине XX в. началось раньше на высоких широтах, а именно в начале 60-х гг., а на низких – в середине 70-х, т. е. волна потепления распространяется от высоких широт к низким. Амплитуда изменений ПТВ максимальна в высокоширотных областях и уменьшается с приближением к экватору. Кроме того, важно отметить, что для высокоширотных областей возрастание среднегодовой ПТВ обусловлено в основном возрастанием в холодный период. Наибольший рост ПТВ наблюдается для ночных (минимальных) температур местной зимы. Эти принципиальные особенности полностью соответствуют ожидаемым из модели [15–17].

Увеличение солнечной и геомагнитной активности в начале XX в. совпало с положительной фазой Северного Атлантического колебания [24], 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 [25]. Это сопровождалось усилением меридиональной циркуляции в атмосфере и поверхностных водах океана, соответствующего интенсивному меридиональному переносу тепла в Арктику в 1900–1940 гг. Увеличение температуры тропосферы (в период 1910–1940 гг.) началось раньше в полярных областях с запаздыванием относительно возрастания геомагнитной активности (примерно на 10 лет), связанным с большой теплоемкостью Арктического бассейна. Эффективное воздействие геомагнитной активности на радиационный баланс полярных областей обеспечило уменьшение радиационного выхолаживания и увеличение ПТВ в высокоширотных областях. С некоторым запаздыванием (1920–1940 гг.) началось эффективное таяние морского льда в Арктическом бассейне и сокращение его площади в теплый сезон (рис. 8). 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, особенно значительное в полярных областях Северного полушария.

В период 1940–1976 гг. наблюдалось похолодание. Учитывая, что в этот период продолжалось возрастание солнечной и геомагнитной активности, также как и содержания CO_2 в атмосфере, причины похолодания до последнего времени были неясны. Отметим очень важную особенность: в низкоширотных областях и в Южном полушарии в этот период потепление продолжалось.

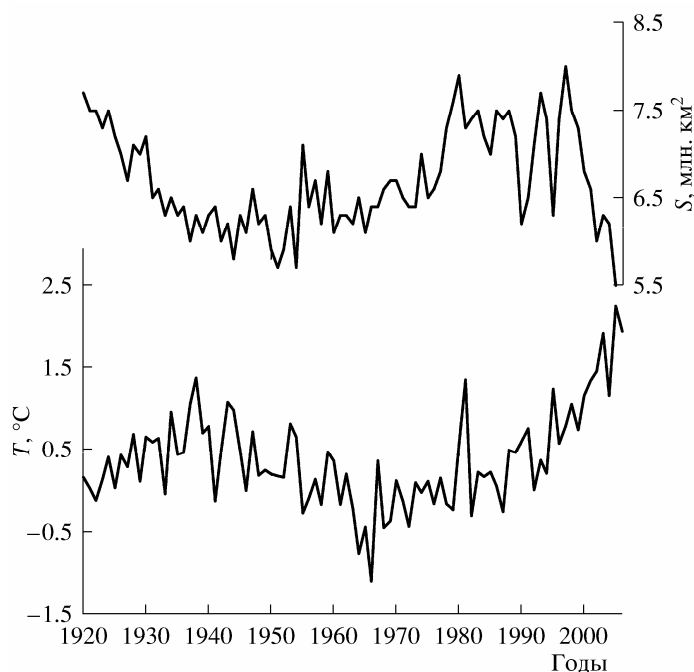


Рис. 8. Изменения площади льда в Арктике и аномалий приземной температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария (57,5–87,5 N) по данным [24, 25]

Причины понижения ПТВ Северного полушария в период 1940–1976 гг.

Основными физическими компонентами климатической системы являются – океан, атмосфера, суша и криосфера. Эти компоненты, определяют теплосодержание земной климатической системы (основным является океан). Процесс и эффективность энергообмена в системе атмосфера – океан – суша (А–О–С) связаны в первую очередь с контрастами температур водной и воздушной оболочек и фазовым различием сезонного хода термических характеристик океана и атмосферы. При оценке роли различных компонент климатической системы необходимо учитывать их теплоемкости. Принимая во внимание для океана только верхний деятельный слой толщиной около 200 м, где отчетливо выражены сезонные колебания, толщину деятельного слоя суши 10 м, соотношение теплоемкостей А : О : С составляет 1 : 60 : 0,5 [26]. Амплитуда годовых колебаний температуры в атмосфере превышает 100 °С, а в отдельных частях океана достигает 15 °С, т. е. амплитуда годовых колебаний температуры поверхности океана и воздуха различаются в 5 раз [26]. Отсюда следует, что роль океанического компонента на порядок превышает роль атмосферного в формировании тепловой изменчивости климатической системы. Распределение по полушариям этих компонентов характеризуется значительной асимметрией. В соответствии с этим реакция на внешнее воздействие и изменения терми-

ческого режима будет существенно различной в Северном и Южном полушариях как в ПТВ, так и в изменениях теплосодержания отдельных компонентов климатической системы.

Из-за различий площадей подстилающей поверхности, занятой сушей и океаном, амплитуда годовых колебаний температуры значительно больше в Северном полушарии, чем в Южном. Это является одной из основных причин того, что океан и атмосфера Северного полушария в среднем теплее Южного. Именно поэтому, возрастание ПТВ в период 1910–1940 гг. в Северном полушарии было значительно большим, чем в Южном, что привело к увеличению асимметрии температуры и теплосодержания атмосферы Северного и Южного полушарий. Кроме того, так как возрастание ПТВ на высоких широтах было большим чем в низкоширотных областях, то меридиональные градиенты температуры в Северном полушарии уменьшились на всех широтах, в то время как в Южном – только на широтах выше 60°.

Таким образом, в начале 40-х гг. значительно изменилось термобарическое поле тропосферы, главным образом в Северном полушарии и экваториальных областях. Это привело к изменению общей циркуляции атмосферы и переходу климатической системы в начале 40-х годов из одного равновесного состояния в другое. Анализ циркуляционных условий по классификации Вангенгейма–Гирса за период 1900–1996 гг. показывает, что действительно в конце 30-х начале 40-х гг. наблюдалась аномально быстрая смена форм циркуляции в Северном полушарии (рис. 9).

Уменьшение меридиональных градиентов температуры привело к ослаблению меридиональной циркуляции в атмосфере и поверхностных слоях Атлантического океана в Северном полушарии и соответствующему уменьшению меридионального переноса тепла от экваториальных областей к высокоширотным в Северном полушарии и постепенному понижению температуры на широтах выше 30°.

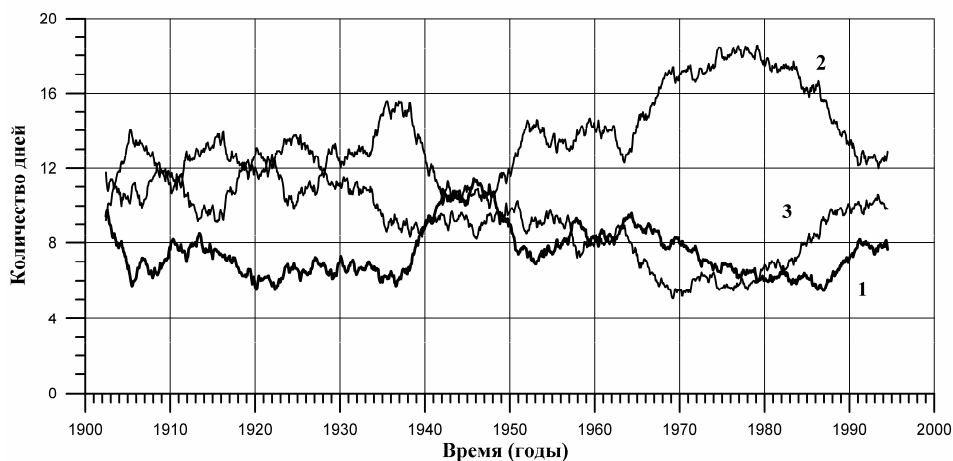


Рис. 9. Среднегодовые значения числа дней в месяце с конкретной формой циркуляции (1900–1996 гг.); 1 – тип С, 2 – тип Е, 3 – тип W по Вангенгейму–Гирсу [27]

В экваториальных широтах и в Южном полушарии вплоть до 60° наблюдалось повышение температуры в период 1945–1978 гг. В этот период теплосодержание атмосферы Северного полушария уменьшалось, в то время как Южного возрастало (рис. 10) [20].

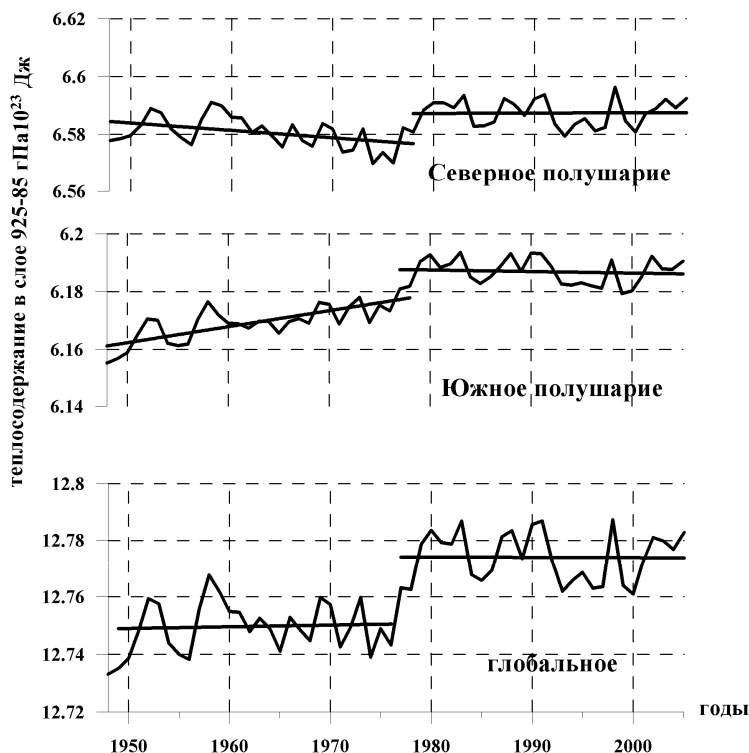


Рис. 10. Изменения теплосодержания свободной атмосферы (925–85 гПа) в Северном, Южном полушариях и глобального

Таким образом, в этот период происходит выравнивание асимметрии температуры и теплосодержания атмосферы Северного и Южного полушарий вплоть до конца 70-х гг. По данным наблюдений в течение короткого промежутка времени (1976–1979 гг.) вновь произошло изменение структуры общей циркуляции тропосферы, которое сопровождалось значительным усилением меридиональной циркуляции в Северном полушарии и ослаблением зональной. Одновременно значительно возросло теплосодержание атмосферы Северного и Южного полушарий рис.10.

Выводы

В заключение отметим некоторые важные и принципиальные особенности функционирования земной климатической системы в XX в.

Во-первых, скорость изменения глобальной приземной температуры воздуха и 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., также как и изменения теплосодержания Мирового океана, являются следствием особенности отклика теплового и динамического режимов Мирового океана и атмосферы на изменение процессов в атмосфере, 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 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.

Результаты проведенного анализа закономерностей изменений геомагнитной активности и термобарических характеристик тропосферы в рамках рассматриваемой модели, а также учет быстрых изменений глобальной циркуляции в атмосфере и океане позволяют сделать вывод, что значительная часть наблюдаемого потепления в XX в. может быть обусловлена изменением уровня солнечной активности.

По нашему мнению, 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.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4 и Программы ОНЗ РАН № 7.12.2.

Список литературы

1. Кондратьев К. Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // Исследование Земли из космоса. – 2004. – № 2. – С. 61–96.
2. Кондратьев К. Я. Неопределенность данных наблюдений и численного моделирования климата // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 4. – С. 93–119.
3. Монин А. С. Климат как проблема физики / А. С. Монин, Ю. А. Шишков // Успехи физ. наук. – 2000. – Т. 170, № 4. – С. 419–445.
4. Чувствительность климатической системы к малым внешним воздействиям / В. П. Дымников [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 4. – С. 77–92.
5. Борзенкова И. И. Быстрые колебания климата в позднеленинское голоцене. Анализ эмпирических данных и возможных причин / И. И. Борзенкова, Е. Л. Жильцова, В. А. Лобанов // Совр. проблемы экологической метеорологии и климатологии. – СПб.: Наука, 2005. – С. 139–151.
6. Jouzel J. Calibrating the isotopic paleothermometer // Science. – 1999. – Vol. 286. – P. 910–911.
7. Борзенкова И. И. О природных индикаторах современного глобального потепления // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 6. – С. 98–110.

8. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event / Alley R. [et. al.] // *Nature*. – 1993. – Vol. 362. – P. 527–529.
9. *Atkinson T. C.* Seasonal temperatures in Britain during the last 22 000 years reconstructed using beetle remain / T. C. Atkinson, K. R. Briffa, G. R. Coope // *Nature*. – 1987. – Vol. 325. – P. 587–582.
10. *Мохов И. И.* Диагностика причинно-следственной связи солнечной активности и глобальной приповерхностной температуры Земли / И. И. Мохов, Д. А. Смирнов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2008. – Т. 44, № 3. – С. 283–293.
11. Final Report of the LWS TR&T Science Definition Team, December 2003 [Elektronik resourse] // The LWS TR&T Science Definition Team. – URL: http://lws-trt.gsfc.nasa.gov/TRT_SDT_Report.pdf (дата обращения 03.05.2011)
12. *Авдюшин С. И.* Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему / С. И. Авдюшин, А. Д. Данилов // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2000. – № 5. – С. 3–14.
13. *Дергачев В. А.* Реконструкция температуры поверхности Земли по данным глубоких скважин, глобальное потепление последнего тысячелетия и долговременная солнечная цикличность / В. А. Дергачев, О. М. Распопов // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2010. – № 3. – С. 401–411.
14. *Жеребцов Г. А.* Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых // *Оптика атмосферы и океана*. – 2004. – № 12. – С. 1003–1017.
15. *Zherebtsov G. A.* The physical mechanism of the solar variability influence on electrical and climatic characteristics of the troposphere / G. A. Zherebtsov, V. A. Kovalenko, S. I. Molodykh // *Advances in Space Research*. – 2005. – Vol. 35. – P.1472–1479.
16. Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли / Г. А. Жеребцов [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. – 2005. – № 12. – С. 1042–1050.
17. *Жеребцов Г. А.* Роль солнечной и геомагнитной активности в изменении климата Земли / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых // *Оптика атмосферы и океана*. – 2008. – № 1. – С. 53–59.
18. *Scafetta N.* Empirical analysis of the solar contribution to global mean air surface temperature change // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2009. – Vol. 71. – P. 1916–1923.
19. Solar Influences on climate / L. J. Gray [et. al.] // *Reviews of Geophysics*. – 2010. – Vol. 48. – P. 1 – 53.
20. *Жеребцов Г. А.* Долговременные изменения температуры и теплосодержания тропосферы в XX в. / Г. А. Жеребцов [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. – 2008. – № 6. – С. 473–478.
21. *Мордвинов А. В.* Долговременные изменения интегрального потока излучения Солнца и погрешности их оценок // *Солнечно-земная физика*. – 2010. – Вып. 15. – С. 9–12.
22. *Svensmark H.* Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage – A missing link in solar-climate relationship / H. Svensmark, E. Fris-Christensen // *Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 1997. – Vol. 59. – P. 1225–1232.
23. *Kernthaler S. C.* Some doubts concerning a link between cosmic ray fluxes and global cloudiness / S. C. Kernthaler, R. Toumi, J. D. Haigh // *Geophys. Res. Letters*. – 1999. – Vol. 26. – P. 863–865.

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

25. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин / И. Е. Фролов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2010. – № 2. – С. 52–61.

26. *Лаппо С. С.* Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан – атмосфера и энергоактивные области мирового океана / С. С. Лаппо, С. К. Гулев, А. Е. Рождественский. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 334 с.

27. Многолетние колебания основных показателей гидрометеорологического режима волжского бассейна // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 10. – С. 16–23.

The regularities of climate changes in XX century and main physical processes, responsible for these changes

G. A. Zherebtsov, V. A. Kovalenko, S. I. Molodykh, O. A. Rubtsova

Annotation. There are discussed the problems, which have the paramount importance for understanding of the nature of climate changes in XX century, and main physical processes, responsible for these changes. There are considered the possible role of solar activity in climate changes at the Earth in last and future. There are shown, physical mechanisms, which can provide for solar activity influence on the earth's climate and weather reduces to the regulation of the energy flux coming from the Earth into space. The special attention is devoted to the mechanism of the solar activity effect on climate characteristics of troposphere by atmosphere electricity. The main causes, which lead to essential changes of the atmospheric electric field at the polar latitudes of the Earth in the time of the heliogeophysical disturbances (the solar cosmic rays; fluxes of charged particles precipitating from the magnetosphere during the heliogeophysical disturbances; the disturbed magnetosphere convection during the magnetic storms), are analyzed.

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

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

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

Коваленко Владимир Афанасьевич
доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки РФ,
главный научный сотрудник,
Институт солнечно-земной физики
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а,
тел. (3952) 42-64-59

Рубцова Ольга Анатольевна
младший научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а,
тел. (3952) 56-45-25