

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

## Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности

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

Поступила в редакцию 29.10.2004 г.

Представлены результаты комплексного анализа долговременных изменений элементов радиационного баланса, глобальной облачности, интенсивности галактических космических лучей, приземной температуры воздуха и характеристик солнечной активности. Обобщены спутниковые и наземные данные по изменениям облачности и приходящей солнечной радиации. Большая часть данных указывает на возрастание, в среднем, общей облачности в течение последнего столетия или по крайней мере на протяжении последних десятилетий.

Приведены расчеты энергетического баланса земной климатической системы и оценки изменения теплосодержания Мирового океана и атмосферы за последние 50 лет. Согласно оценкам лишь небольшая доля падающей энергии (~0,1%) расходуется на изменение теплосодержания атмосферы и океана. Обсуждается значимость возможного влияния изменений солнечной постоянной на энергетический баланс атмосферы. Из анализа экспериментальных данных следует, что, с одной стороны, наблюдается уменьшение радиационного потока, приходящего на Землю, с другой, — очевидное увеличение теплосодержания Мирового океана, суши и земной атмосферы. Это позволяет считать, что для энергетического баланса земной климатической системы наиболее важными являются не столько вариации величины потока суммарной энергии, приходящей непосредственно на Землю, сколько изменения уходящего потока длинноволнового излучения.

Обсуждаются возможные механизмы солнечно-климатических связей, которые могут играть важную роль как на коротких, так и на длинных интервалах времени. Рассматривается возможная роль космических лучей и электрического поля атмосферы, которые, с одной стороны, подвержены влиянию солнечной переменности, а с другой, — могут оказывать значительное воздействие на распределение в атмосфере ядер конденсации, фазовое состояние воды в атмосфере, облачный покров и тем самым изменять радиационный баланс атмосферы.

### Введение

Исследования глобальной изменчивости атмосферы, климата и среды обитания человека в настоящее время являются одними из наиболее приоритетных. Особое внимание уделяется изучению природы глобального потепления (ГП) климата, его проявлениям в регионах планеты и прогнозам изменений климата в ближайшие десятилетия. Это фундаментальный вопрос, ответ на который имеет не только теоретическое и прикладное значение, но и политико-экономическое. Вопрос о том, в какой мере глобальное потепление в последние десятилетия имеет антропогенное происхождение (за счет усиления парникового эффекта, вызванного хозяйственной деятельностью человека) — в противоположность естественному происхождению (например, за счет солнечной активности, естественной изменчивости глобальной климатической системы, вулканической деятельности и др.), имеет первостепенное значение для понимания характера изменения климата на Земле в прошлом и в будущем. К сожалению, модельные расчеты количественного вклада  $\text{CO}_2$  в наблюдаемое и прогнозируемое глобальное потепление на основе современных климатических моделей дают возрастание глобальной температуры в очень широком диапазоне — от 1 до 5° [1]. Это не позволяет сделать однозначный вывод о том, что

потепление в XX в. обусловлено исключительно антропогенными факторами, и тем более утверждать, что только  $\text{CO}_2$  является ответственным за наблюдаемое глобальное потепление.

Вместе с тем наиболее весомым и обоснованным аргументом, который заставляет сомневаться в том, что наблюдаемое ГП обусловлено только вкладом  $\text{CO}_2$  антропогенного происхождения, является отсутствие ответа на вопрос, каковы причины существования теплых и холодных периодов в прошлом тысячелетии. Наблюдаемые корреляции долговременных изменений глобальной температуры и  $\text{CO}_2$  не означают, что причиной ГП является  $\text{CO}_2$ , так как увеличение температуры океана (которое реально наблюдается) также приводит к увеличению  $\text{CO}_2$  в атмосфере, т.е. увеличение  $\text{CO}_2$  может являться следствием, а не причиной глобального потепления [2].

### 1. Радиационный баланс в земной атмосфере

Одним из ключевых параметров, определяющих глобальный климат, является радиационный баланс на верхней границе атмосферы для всей земной поверхности, который характеризует обмен энергией между земной климатической системой

и космосом. Нарушение этого баланса приводит к изменению климата

Поток коротковолновой радиации, падающий на верхнюю границу атмосферы, достаточно хорошо известен — это солнечная постоянная (СП). По данным спутниковых измерений с 1978 по 2002 г. [3], которые приведены на рис. 1, СП изменялась не более чем на 0,15%.

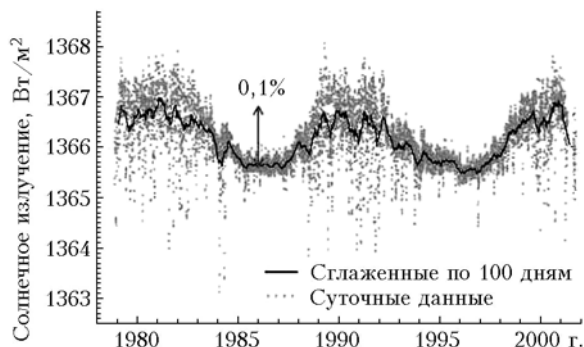


Рис. 1. Вариации солнечной постоянной по радиометрическим измерениям на спутниках с 1978 по 2002 г. [3]

Возможны ли более значимые изменения потока солнечной радиации? Согласно оценкам [3] в период Маундеровского минимума изменения светимости Солнца могли достигать максимально 0,3%. 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. Отметим, что практически вся их энергия, так же как и изменяющаяся часть СП, поглощается в верхней атмосфере — магнитосфере, ионосфере и стратосфере Земли.

Что касается уходящего коротковолнового потока (альbedo облаков и земной поверхности) и длинноволновой радиации, излучаемой земной поверхностью и атмосферой, то определение этих потоков по данным спутниковых наблюдений представляет сложную задачу, так как возможности аппаратуры и методические трудности спутниковых измерений не позволяют определить энергетический баланс с необходимой точностью [4]. Количественную оценку дисбаланса, усредненную за большие промежутки времени, с достаточно большой точностью можно получить на основе измерений теплосодержания земной климатической системы, изменения которого за период с 1955 по 1996 г. приведены в работах [5, 6]. Эти данные содержат 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; увеличение теплосодержания атмосферы —  $0,66 \cdot 10^{22}$  Дж. Полное увеличение теплосодержания  $Q_{\Sigma}$  за 40 лет составляет  $2 \cdot 10^{23}$  Дж. Предполагая, что эти изменения происходили равномерно за рассматриваемый интервал времени, скорость изменения теплосодержания или мощность источника, который обеспечивал изменения теплосодержания:

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

Это приближенная оценка. Реальная мощность несколько больше, так как не учтено изменение теплосодержания суши. Представляет интерес сравнить полученную оценку с энергией, поступающей от Солнца. Известно, что солнечная постоянная составляет  $1366 \text{ Вт/м}^2$

Мощность солнечного излучения на верхней границе атмосферы равна  $1,7 \cdot 10^{17}$  Вт. Следовательно, на изменение теплосодержания земной климатической системы в последние 40 лет расходуется  $\sim 0,1\%$  падающей энергии Солнца. Если вариации солнечной постоянной усваиваются климатической системой с такой же эффективностью, то наблюдаемые изменения термического режима атмосферы и соответственно глобальное потепление невозможно объяснить наблюдаемыми изменениями входящего потока солнечного излучения. Учитывая вышеприведенные оценки эффективности радиационного баланса, в предположении, что радиационные (передаточные) характеристики земной климатической системы для данной эпохи изменяются незначительно при малых вариациях входного потока (менее 1%), даже такие изменения солнечной постоянной не могут значительно повлиять на теплосодержание земной климатической системы и на климат Земли. Таким образом, изменяющаяся часть внешнего воздействия непосредственно не может обеспечить изменение энергетики земной климатической системы.

На этом основании можно сделать вывод, что земная климатическая система достаточно устойчива и слабо реагирует на изменения поступающего извне потока энергии и более чувствительна к изменениям параметров, управляющих уходящим потоком. Следовательно, можно считать, что наблюдаемые изменения теплосодержания земной климатической системы как в XX в., так и в прошлом тысячелетии обусловлены изменениями потока энергии, излучаемой земной климатической системой 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 газовым составляющим, в частности таким, как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ , метан и др.

## 2. Проявление гелиогеофизических характеристик в погодноклиматических параметрах тропосферы

Изучение влияния солнечной активности на погоду и климат имеет давнюю историю (см. некоторые обзоры) [7–13]. Большинство авторов отмечают сходство в поведении характеристик климата и солнечной активности, особенно на больших временных масштабах. Исторические данные показывают, что не менее, а возможно, более значимые изменения могут быть обусловлены вариациями солнечной цикличности.

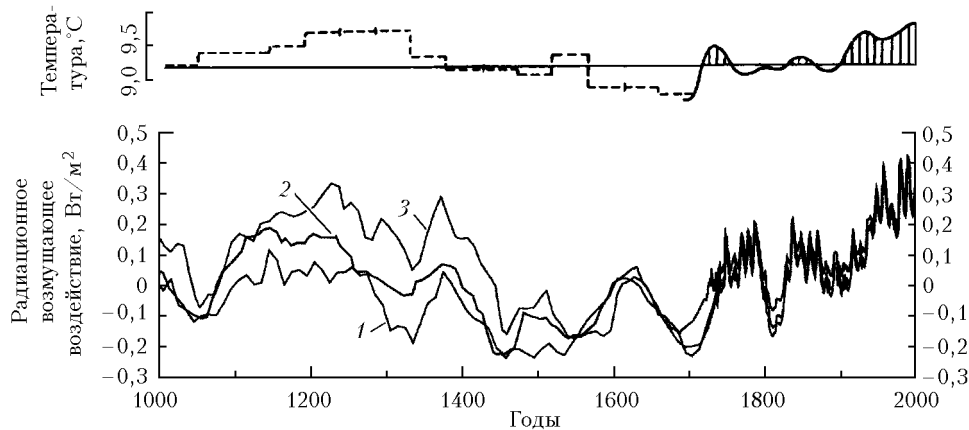


Рис. 2. Долговременные изменения солнечной активности по непосредственным и косвенным данным (1, 3 — по данным C14, 2 — по данным Be10 [8]) в сравнении с аномалиями приземной температуры воздуха (ПТВ)

Существуют убедительные доказательства того, что с вариациями солнечной цикличности были связаны периоды похолоданий и потеплений, по крайней мере в средние и древние века. Долговременные изменения солнечной активности в сопоставлении с климатическими характеристиками планеты иллюстрирует рис. 2.

Видно, что мировой климат за последние 1000 лет испытывал изменения, довольно точно соответствовавшие вариациям солнечной активности: в XI–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.

В обзоре [14] приведены данные по температуре и солнечной активности, которые также показывают, что за исключением аномалий температуры, связанных с мощными вулканическими извержениями, изменения глобальной температуры Северного полушария в основном следуют вариациям солнечной активности (рис. 3).



Рис. 3. Аномалии ПТВ Северного полушария и данные солнечной радиации (реконструированные и наблюдаемые) для периода 1600–2000 гг. [14]

Долговременные изменения 11-летних скользящих средних, полученные по результатам инструментальных наблюдений [11], приведены на рис. 4.

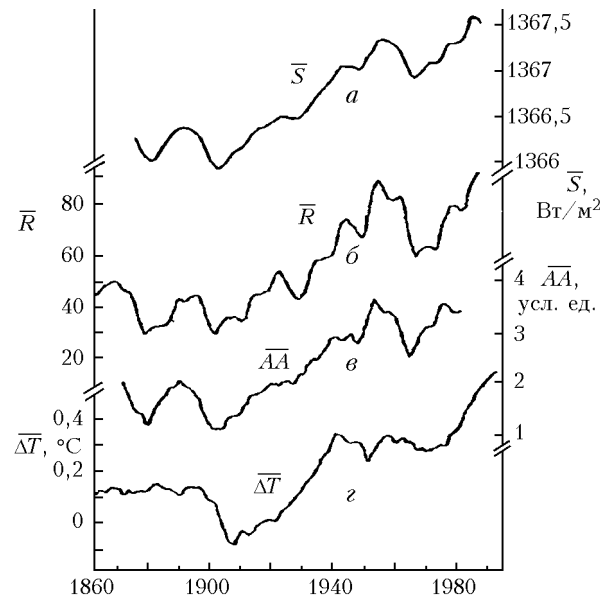


Рис. 4. Долговременные изменения солнечной радиации (а), чисел Вольфа (б), геомагнитного индекса АА (в) и аномалий ПТВ (z) [11]

Очевидно, что все кривые имеют похожие долговременные тренды. Тем не менее до сих пор вопрос о существовании этой связи остается дискуссионным. Дело в том, что на малых временных интервалах связь часто оказывается неоднозначной. В одних регионах связь положительная, в других — отрицательная, третьих она отсутствует вовсе, иногда наблюдается смена знака связи.

Многочисленные корреляции между различными гелиогеофизическими характеристиками и погодой и климатом разделяются на две категории: долговременные — соответствующие связи с климатом, и кратковременные — соответствующие погодным или синоптическим процессам. При рассмотрении долговременных связей, как правило, в качестве меры солнечной активности используют число солнечных пятен, числа Вольфа, длительность и мощность 11-летнего солнечного цикла, индекс геомагнитной активности АА. При рассмотрении кратковременных проявлений солнечной активности

в погодных характеристиках в качестве реперных дат обычно используются моменты солнечных вспышек, пересечений секторных границ межпланетного магнитного поля, Форбуш-понижений в интенсивности космических лучей и главной фазы геомагнитных бурь. В ряде работ [7–10] высказывалась идея, что атмосферное электричество может быть связующим звеном между изменениями солнечной активности и параметрами тропосферы.

Ниже мы приведем косвенные свидетельства влияния гелиогеофизических процессов на вариации различных атмосферных характеристик, возможно, обусловленные данным механизмом. Как правило, для выявления эффекта используется метод наложенных эпох.

Секторная структура межпланетного магнитного поля является отображением глобального магнитного поля Солнца, переносимого солнечным ветром и образующего в гелиосфере деформированный токовый слой. Полное обращение секторной структуры вокруг Земли — 27 сут. Севернее токового слоя ММП направлено от Солнца, южнее — к Солнцу. Полярность ММП изменяется каждые 11 лет, приблизительно 2 года спустя после максимума 11-летнего цикла.

В многочисленных работах было установлено, что различные гелиогеофизические характеристики закономерным образом изменяются при пересечении секторной границы. Безусловно, непосредственно сам по себе токовый слой не может вызвать заметных эффектов, а является лишь репером, указывающим на закономерные изменения физических условий на Солнце, в частности конфигурации крупномасштабных магнитных полей и их динамики, которые определяют параметры солнечного ветра и ММП.

На рис. 5 показано распределение индекса геомагнитной возмущенности  $K_p$  относительно секторных границ, соответствующих нулевому дню.

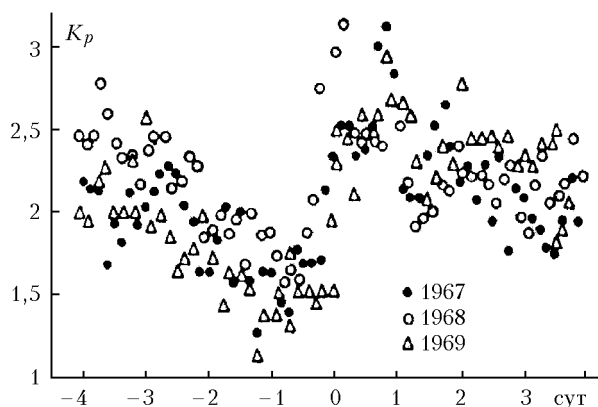


Рис. 5. Изменение индекса  $K_p$  относительно границ секторов межпланетного магнитного поля (в нулевые сутки граница проходит через Землю)

Видно, что минимум геомагнитной возмущенности предшествует пересечению секторных границ на 1 сут, после прохождения наблюдается увеличение геомагнитной активности, которая затем медленно затухает в течение 3–4 сут. На рис. 6 методом на-

ложенных эпох показано изменение интенсивности космических лучей в положительных и отрицательных секторах межпланетного магнитного поля. Очевидны закономерные вариации интенсивности космических лучей в пределах сектора, которые существенно зависят от знака сектора. Минимум интенсивности космических лучей наблюдается на 2–3-и сут после прохождения секторной границы и соответствует максимуму геомагнитной активности.

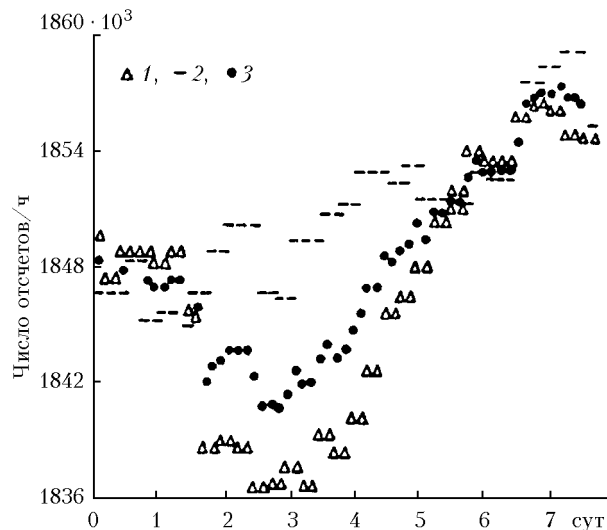


Рис. 6. Изменение интенсивности галактических космических лучей в положительном и отрицательном секторах межпланетного магнитного поля: 1 — поле от Солнца; 2 — поле к Солнцу; 3 — независимо от направления поля

Электрический потенциал ионосферы — Земля, а следовательно, и ток проводимости также зависят от секторной структуры. На рис. 7 показано распределение электрического поля относительно пересечений секторных границ. Как оказалось, при прохождении секторных границ меняются многие характеристики, в частности индекс завихренности VAI (Vorticity Area Index), характеризующий суммарную площадь, занятую в Северном полушарии циклоническими образованиями.

Закономерные изменения индекса VAI при пересечении секторных границ можно видеть по данным, приведенным на рис. 8 [7].

Значимое возрастание VAI наблюдается за два дня до пересечения секторной границы, затем VAI уменьшается и достигает минимума через 1 сут после пересечения границы. Важно отметить, что эффект значительно усиливается для секторных границ, которые сопровождаются потоками протонов с энергией десятки—сотни мегаэлектронвольт [7]. Так как электрическое поле атмосферы зависит от потока солнечных космических лучей, то данный эффект косвенно подтверждает гипотезу влияния солнечной активности на параметры тропосферы. Один из серьезных аргументов, подтверждающих реальность влияния солнечной переменности на погоду, — значительное ухудшение прогноза индекса VAI [7] в течение одного-двух дней после пересечения Землей секторной границы межпланетного магнитного поля.

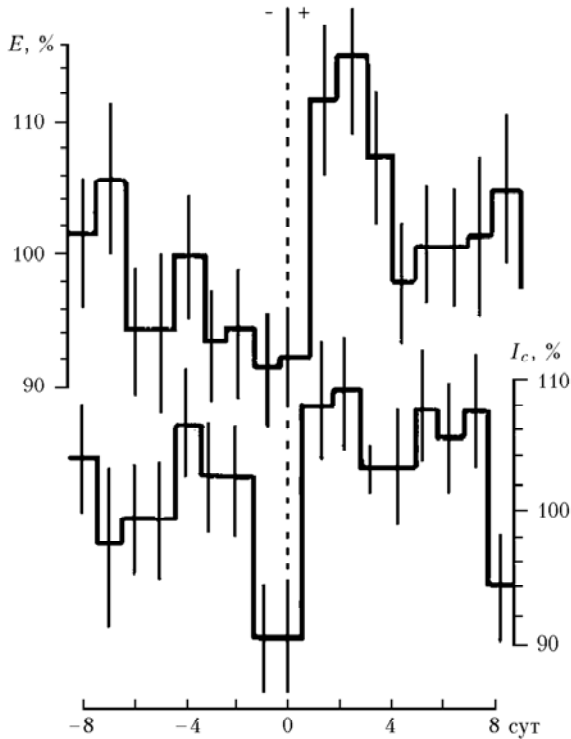


Рис. 7. Вариации напряженности электрического поля и плотности тока относительно секторных границ. Результаты анализа методом наложения эпох напряженности электрического поля  $E$  при ясной погоде и плотности тока атмосфера-Земля  $I_c$  на Цугшпитце

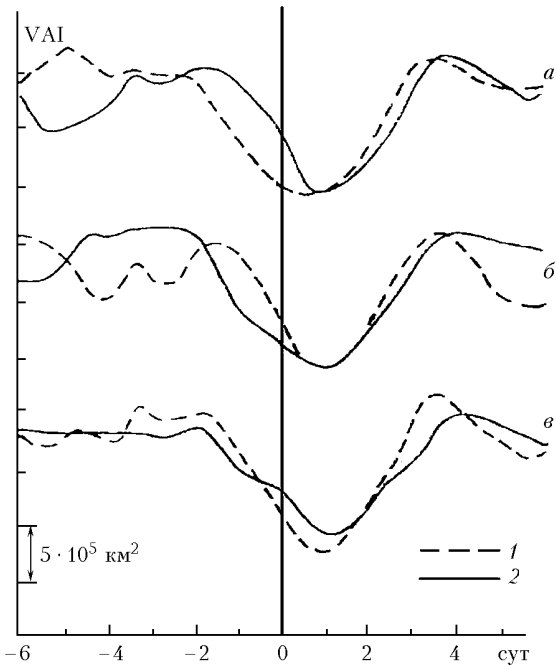


Рис. 8. Изменение индекса завихренности VAI до и после прохождения секторных границ ММП:  $a$  – смена секторов: 1 – положительного на отрицательный, 2 – отрицательно на положительный, 24 случая ГМС;  $b$  – зимний сезон: 1 – вторая половина зимы, 22 случая, 2 – первая половина зимы, 32 случая ГМС;  $c$  – периоды: 1 – 1967–1970 гг., 2 – 1964–1966 гг.

На рис. 9 приведены результаты статистического анализа реакции в характеристиках атмосферного давления на геомагнитные возмущения.

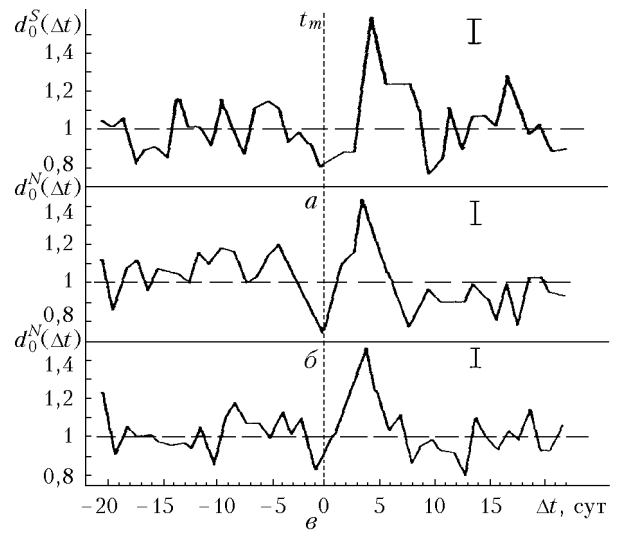


Рис. 9. Нормированная дисперсия суточных разностей давления для областей:  $a$  – Южного полушария;  $b, c$  – Северного полушария во время геомагнитной бури ( $t_m$  – момент начала геомагнитной бури,  $I$  – стандартное отклонение) [15]

Очевидно, что отклик на геомагнитную бурю проявляется практически одинаково в обоих полушариях Земли. Области наибольшего возрастания неустойчивости тропосферы располагаются над океанами в зонах повышенной неустойчивости атмосферы, вблизи авроральной зоны. Время реакции тропосферы в этих областях 4–5 сут, амплитуда 50–60% [15].

В работе [16] была установлена высокая степень связи между длительностью солнечных циклов и температурой Северного полушария (рис. 10).

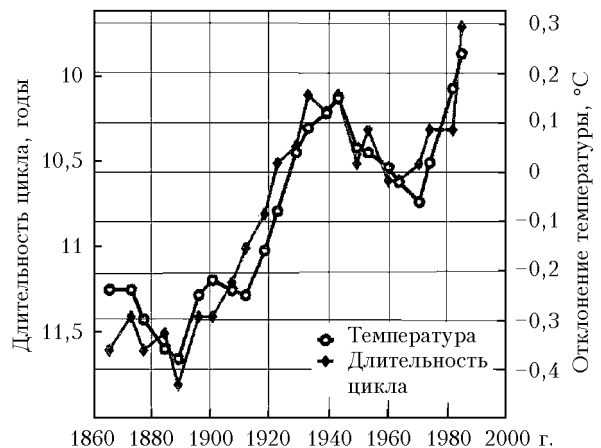


Рис. 10. Изменения температуры Северного полушария в сравнении с длительностью солнечных циклов

Эти результаты свидетельствуют о реальности влияния гелиокосмических факторов на климат и заставляют усомниться в правильности концепции, что наблюдаемое потепление обусловлено в основном

антропогенным фактором, и тем самым стимулируют необходимость дальнейших исследований связи солнечной активности с климатом Земли. Казалось бы, тесная связь изменений глобальной приземной температуры воздуха Северного полушария с длительностью солнечного цикла ( $r = 0,95$ ) [16] указывает на то, что в одной из ключевых климатических характеристик отсутствуют признаки глобального потепления, связанные с антропогенным фактором. Однако к этому выводу следует относиться с большой осторожностью. Дело в том, что, как известно, глобальная ПТВ тесно связана с характеристиками Мирового океана, а следовательно, слишком инерционна.

Большинство экспертов связывают потепление с парниковым эффектом. В этом случае, как показывают модельные расчеты, наиболее существенных изменений следует ожидать во внутриконтинентальных районах Евразии. Прибайкалье, располагаясь в центральной части континента, попадает, таким образом, в зону интенсивных климатических и экологических изменений. Для ПТВ в центре больших континентов сглаживающая роль Мирового океана меньше, а межгодовые изменения весьма значительны. Поэтому для выявления достоверных трендов необходимы усреднения по длительным временным периодам. ПТВ в центральных частях континентов особо чувствительна к глобальному потеплению. В связи с этим изучение особенностей долговременных вариаций ПТВ в Прибайкалье представляет особый интерес.

В работах [17, 18] была изучена связь ПТВ Прибайкалья с различными характеристиками солнечной активности. Оказалось, что ПТВ Прибайкалья тесно связана не с длительностью цикла солнечной активности, а с его средней мощностью. На рис. 11 представлены данные ПТВ Прибайкалья, усредненные по циклам солнечной активности, и средняя мощность этих циклов.

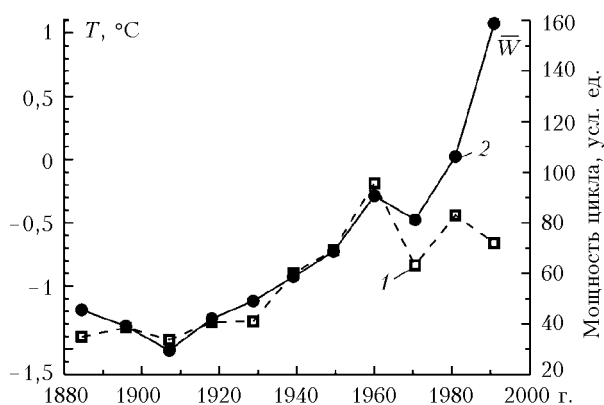


Рис. 11. Сравнение средней мощности  $\bar{W}$  солнечного цикла (1) с вариациями температуры воздуха в Иркутске (2), усредненной по солнечному циклу

Очевидно, что, как и в [16], основные значимые вариации температуры воздуха в регионе за период 1881–1960 гг. обусловлены солнечной переменностью. Однако начиная с 60-х гг. и по настоящее

время при сохранении влияния солнечной переменности наблюдается явное воздействие другого фактора, роль которого непрерывно возрастает и в последнее десятилетие уже превышает вклад солнечной переменности.

Наиболее чувствительным и важным в любой климатической модели является правильное описание обратных связей, которые могут либо усиливать, либо подавлять начальное возмущение. Ключевую роль играет изменение содержания в атмосфере водяного пара и облачно-радиационная связь. Анализ данных наблюдений глобальных изменений ПТВ, так же как и расчеты с помощью глобальной климатической модели (ГКМ), показывает, что воспроизвести наблюдаемые климатические изменения с учетом только естественных факторов невозможно. Результаты расчетов с помощью различных современных ГКМ указывают на значительный вклад антропогенных факторов в тренды ПТВ в последние десятилетия [19].

Однако следует подчеркнуть, что наблюдаемое увеличение  $\text{CO}_2$  может быть не причиной глобальной температуры, а следствием возрастания температуры океана [2].

Таким образом, в изменениях ПТВ в Прибайкальском регионе, так же как и в изменениях глобальной ПТВ, очевиден значимый сигнал солнечной переменности. Однако в отличие от глобальной ПТВ амплитуда изменений значительно больше, основные изменения ПТВ в Прибайкалье в XX в. произошли в основном в зимне-весенний период и практически без заметного запаздывания относительно мощности солнечного цикла. Важно отметить, что рост температуры в регионе во второй половине XX в. происходил на фоне ослабления прихода суммарной солнечной радиации в Прибайкалье [20, 21]. Столь высокий и стабильный уровень корреляции климатических вариаций Прибайкалья и параметров солнечной активности связан с тем, что во внутриконтинентальных областях работают дополнительные факторы, усиливающие эту связь. Таким фактором, по-видимому, являются присутствие в Прибайкалье (сибирского) азиатского антициклона и его чувствительность к изменениям глобальной циркуляции атмосферы, которая, в свою очередь, чувствительна к изменениям термического баланса атмосферы, обусловленного как солнечной активностью, так и антропогенным фактором. Очевидно, что все вариации температурного режима региона, как и долговременные тренды, так или иначе связаны с изменениями общей циркуляции атмосферы.

Главным фактором, который ставит под сомнение реальность и значимость влияния солнечной активности на погоду и климат, является отсутствие надежного физического механизма, способного исчерпывающе объяснить многочисленные корреляции между различными геологофизическими индексами и климатическими характеристиками тропосферы.

Одной из основных проблем в рассмотрении механизма влияния солнечной активности на погоду и климат является то, что изменения потока энергии, достигающего тропосферы за счет солнеч-

ной активности, пренебрежимо малы по сравнению с запасом энергии в стратосфере и тропосфере или даже с энергией одного циклона. Ясно, что энергетика солнечной переменности недостаточна для того, чтобы оказать значительное непосредственное влияние на процессы в тропосфере. Кроме того, практически все исследователи влияния солнечной переменности на погоду и климат сталкиваются с трудностью выделения внешнего сигнала на фоне собственных мощных возмущений в системе «атмосфера–океан». Ясно одно, что влияние солнечной активности на погоду не одинаково и даже не однозначно в разных регионах Земли. Очень важной представляется роль атмосферной циркуляции, особенно для высоких широт.

### 3. Облачность, космические лучи, климат

На рис. 12 представлена обобщенная схема возможных солнечно-климатических связей, которая иллюстрирует возможные механизмы, посредством которых солнечные процессы могут оказывать влияние на погоду и климат. Выделены звенья, которые могут иметь, на наш взгляд, особое значение как на коротких, так и на длинных интервалах времени, — это солнечная радиация, облачный покров, парниковые газы, аэрозольное поле атмосферы, космические лучи, ядра конденсации, электрическое поле атмосферы.

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. Преобладание одного из них может приводить либо к охлаждению, либо к нагреву атмосферы.

Баланс зависит от характеристик облачности. Общепринятой является точка зрения, что увеличение нижней облачности приводит к охлаждению атмосферы, а увеличение верхней — к нагреву.

Любая облачность приводит к уменьшению потерь энергии климатической системой, в то время как при наличии приходящего потока влияние облачности на климатическую систему оказывается очень сложным и неоднозначным. Это связано с описанием сложных и неоднозначных обратных связей в глобальных климатических моделях. Обратные связи либо усиливают, либо подавляют начальное возмущение в климатической системе. Кроме того, значительное влияние на результаты моделирования оказывает изменение глобальной циркуляции атмосферы. Поэтому, несмотря на значительный прогресс в математическом моделировании земной климатической системы с помощью современных глобальных климатических моделей, описание обратных связей, а следовательно, и чувствительность к малым внешним воздействиям остаются открытыми [1].

На возможность модуляции альбедо Земли за счет изменений облачности, обусловленных вариациями потока галактических космических лучей, указывалось в работе [22]. Космические лучи могут влиять на формирование облаков посредством ионизации тропосферного воздуха. Так как поток и спектр космических лучей модулируются межпланетным магнитным полем, подверженным сильному влиянию магнитного поля Солнца, космические лучи могут представлять одно из связующих звеньев между солнечной активностью и глобальным климатом. Этот механизм стал особенно привлекательным после обнаружения для периода 1980–1995 гг. сильной корреляции между фактором облачности над океанами на средних широтах и потоком космических лучей (рис. 13) [23].

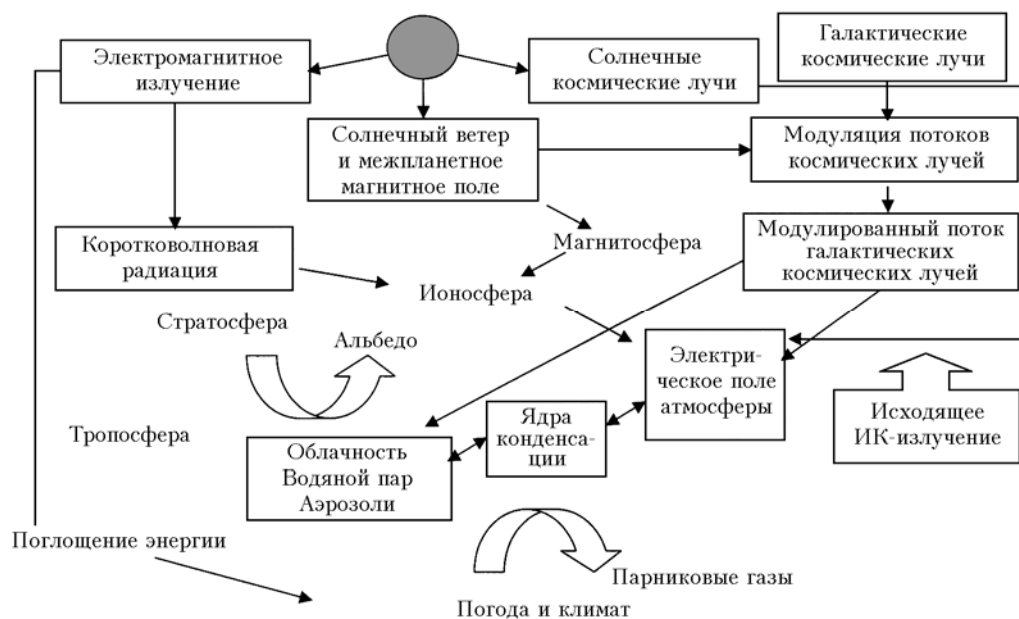


Рис. 12. Схема солнечно-климатических связей

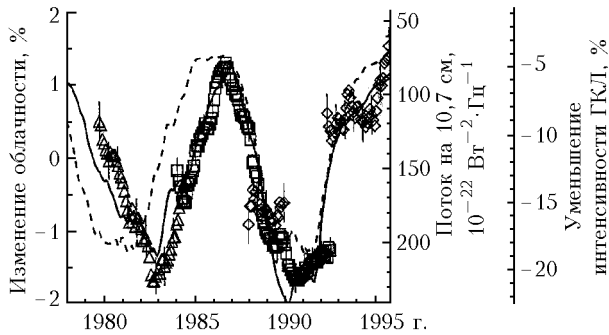


Рис. 13. Сравнение общей облачности, вариаций интенсивности галактических лучей (ГКЛ) и потока радиополучения на 10,7 см

К сожалению, включение более полных экспериментальных данных в анализ связи космических лучей с облачностью выявило значительные противоречия [24, 25]. Уровень и даже знак корреляции зависят от широтной зоны, характера подстилающей поверхности (суша, океан), высоты облачного покрова. До 1991 г. поток космических лучей достаточно хорошо коррелировал на умеренных широтах с общей облачностью, однако после 1991 г. характер связи изменился. Прямую корреляцию с изменением потока космических лучей стала демонстрировать нижняя облачность, изменявшаяся после 1991 г. в противофазе с изменением общего количества облаков. Это иллюстрирует рис. 14, на котором приведены данные о вариациях общей и нижней облачности, а также вариации потока галактических космических лучей. Очевидно, что в период 1983–1991 гг. сохраняется тесное соответствие между потоком космических лучей и общей облачностью, однако после этого периода кривые расходятся.

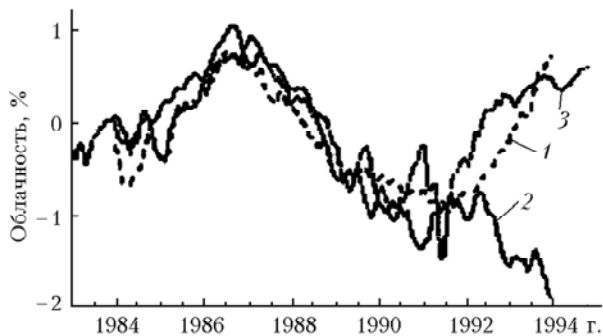


Рис. 14. Изменение облачности нижнего яруса (1), общей облачности (2) по спутниковым данным в сравнении с интенсивностью ГКЛ (3)

Таким образом, с учетом данных для периода 1992–1994 гг. обнаруживается, что новая серия данных не подтверждает предыдущие результаты в отношении общей облачности. Наоборот, имеет место более сильная корреляция галактических космических лучей с нижней облачностью.

Особый интерес и значимость представляет сравнение облачности и интенсивности галактических лучей для длинных рядов наблюдений. Используя данные наблюдений общей облачности, приведенные в работе [26], нами проведено сравне-

ние изменений общей облачности с временными вариациями интенсивности ГКЛ для периода 1950–2000 гг. (рис. 15). Прежде всего, отметим явное присутствие 11-летней вариации во всех рядах данных. Однако очевидно, что глобальная облачность и интенсивность ГКЛ скорее антикоррелируют. Это противоречит основной гипотезе влияния КЛ на облачность. Данное противоречие снимается, если предположить, что глобальная и нижняя облачность также антикоррелируют, причем уменьшение нижней облачности сопровождается более эффективным по площади возрастанием верхней и соответственно потеплением на Земле в целом. Сдвиг по фазе между интенсивностью ГКЛ и глобальной облачностью не имеет физического смысла и, скорее, подтверждает отсутствие физической связи между ними.

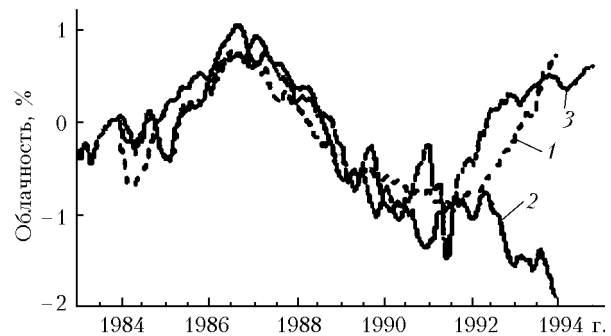


Рис. 15. Сравнение глобальной облачности [26] с временными вариациями интенсивности галактических космических лучей и АА-индексом геомагнитной активности

Кроме того, следует отметить, что для зимнего периода в полярных областях влияние ГКЛ будет противоположным по сравнению с низкими широтами, т.е. увеличение интенсивности ГКЛ будет приводить к потеплению в этих областях.

Таким образом, есть основания считать, что ГКЛ оказывают влияние на формирование облачности. Однако несмотря на привлекательность механизма влияния ГКЛ на облачность и, соответственно, на погоду и климат, эта гипотеза не получила пока сколько-нибудь убедительного подтверждения с точки зрения реальных количественных оценок [12, 24, 25].

К сожалению, ряды спутниковых данных охватывают только последние десятилетия, поэтому в качестве дополнительной информации могут быть использованы данные по продолжительности солнечного сияния. Однако эти данные не дают информации о типе облачности. Известно, что продолжительность солнечного сияния является косвенной характеристикой общей облачности. Сопоставление полученных рядов со спутниковыми данными за июль 1983 – август 1994 гг. В этот период, однако, происходило уменьшение потока космических лучей, что согласно найденным корреляционным связям должно было бы приводить к уменьшению по крайней мере нижней облачности. Противоречие снимается, если одновременно происходило увеличение количества облаков верхнего яруса.

Обобщение спутниковых и наземных данных по изменениям облачности и приходящей солнеч-



ной радиации за последние 40 лет [26], представленное в таблице, указывает на возрастание количества облаков и уменьшение радиации. Последнее может быть связано с изменением не только количества облаков и их распределения по высоте, но и количества атмосферного аэрозоля.

Во многих работах постулируется, что вариации солнечной радиации, приходящей непосредственно на Землю, являются наиболее важным климатообразующим фактором. Однако этот постулат не совсем корректен и не находит подтверждения при анализе наблюдательных данных. Дело в том, что увеличение любой облачности будет приводить

к уменьшению энергии, приходящей на Землю, тем не менее это не будет означать, что должно наблюдаться похолодание. Все зависит от того, какая облачность изменилась – верхняя или нижняя. Это подтверждается анализом долговременных изменений элементов радиационного баланса атмосферы по данным сети станций [26]. За последние 50 лет наблюдается статистически значимое снижение прямой и суммарной солнечной радиации [20, 21, 27–29]. В то же время, несмотря на уменьшение солнечной радиации, приходящей на Землю, в данный период наблюдается глобальное потепление.

Виды наблюдений	Общая облачность	Нижняя облачность	Верхняя облачность	Период
<i>Наземные данные</i>				
Солнечное сияние в Ирландии (уменьшение)	Возрастание облачности	–	–	1881–1998
Солнечное сияние в Израиле (уменьшение)	»	–	–	1979–1995
Синоптическая облачность над СНГ	»	Уменьшение	Возрастание	1936–1990
Синоптическая облачность над океанами	»	Возрастание	–	1952–1995
Синоптические данные (Австралия, Северная Америка, Индия, Европа...)	»	–	Возрастание	1900–1990
Наземные наблюдения солнечной радиации	»	–	–	1960–2000
<i>Спутниковые данные</i>				
ISCCP C2	Стабильная	–	Возрастание	1983–1991
ISCCP D2	Стабильная	Уменьшение	Стабильная	1983–1994
DMSP (водяные облака над океанами)	Возрастание	–	–	1988–1998
HIRS (только перистые облака)	–	–	Возрастание	1989–1996

Очевидно, что космические лучи – не единственное звено этой связи. С помощью КЛ невозможно объяснить реакцию тропосферы на геомагнитные возмущения, как было показано в многочисленных работах Мустеля и др. [15]. Ниже мы приведем косвенные свидетельства влияния гелиогеофизических процессов на вариации различных атмосферных характеристик. Как правило, для выявления эффекта используется метод наложенных эпох.

Совершенно очевидно, что если влияние солнечной активности на климатические характеристики тропосферы значимо, а так как изменение потока энергии, достигающего нижней тропосферы за счет вариаций солнечной активности, пренебрежимо мало 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.

#### 4. Вариации солнечной радиации

В работах [20, 21] проведен анализ элементов радиационного баланса атмосферы на станциях Байкальского региона Восточной Сибири и на сети других станций за последние 50 лет. Установлено, что на подавляющей части территории наблюдалось статистически значимое снижение прямой и суммарной солнечной радиации, составляющее 6,3%, в среднем и 2,5% за 10 лет. Темпы уменьшения прямой солнечной радиации иллюстрирует рис. 16, на котором показаны изменения среднегодовых значений суточных сумм прямой солнечной радиации на ст. Иркутск.

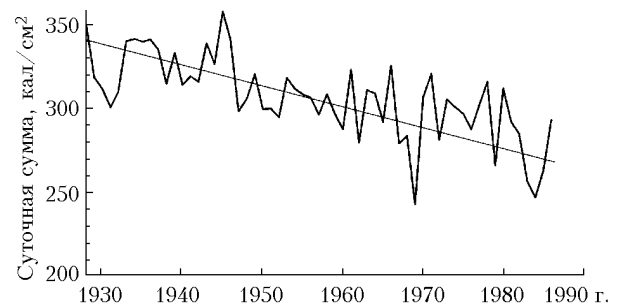


Рис. 16. Изменения среднегодовых значений суточных сумм прямой солнечной радиации на ст. Иркутск

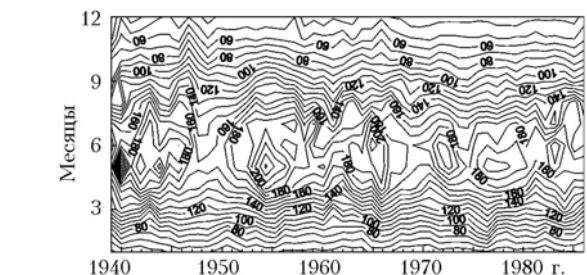
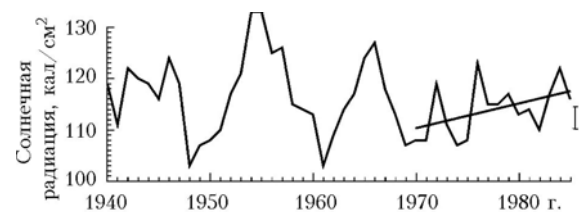


Рис. 17. Вариации годового хода рассеянной радиации в Иркутске за период с 1939 по 1986 г.

Совершенно другой характер имеют долговременные изменения рассеянной радиации. На рис. 17 приведена карта изменения со временем рассеянной радиации для ст. Иркутск, имеющей длинный ряд наблюдений (более 50 лет).

Кроме естественного сезонного хода в распределении радиации до 60-х гг. отчетливо выделяется 11-летняя периодичность. Максимумы рассеянной радиации наиболее ярко выражены в весенне-летний период и соответствуют минимумам солнечной активности. Начиная с 60-х гг. эта связь нарушается, амплитуда вариаций рассеянной радиации снижается, одновременно с уменьшением максимальных значений возрастают минимальные значения интенсивности. Аналогичная 11-летняя периодичность в изменениях прозрачности атмосферы была обнаружена в работах [30, 31].

## **5. Механизм влияния солнечной переменности на электрические характеристики тропосферы**

В ряде работ [7, 22, 32–35] высказывалась идея, что атмосферное электричество может быть связующим звеном между изменениями солнечной активности и параметрами тропосферы. Подробный обзор состояния проблемы связи параметров атмосферного электричества с солнечной переменностью и важная роль атмосферного электричества в полярных широтах подробно представлены в работах [10, 36].

Следует подчеркнуть, что практически во всех работах, посвященных влиянию космических лучей на параметры атмосферного электричества, рассматривается их влияние на проводимость атмосферы, изменение тока ионосфера–Земля и соответствующие изменения вертикального электрического поля. Однако изменения проводимости, обусловленные вариациями интенсивности космических лучей, не могут объяснить наблюдаемые кратковременные изменения потенциала  $V$  и напряженности электрического поля  $E$  в нижней тропосфере полярных широт [35].

Согласно [10] во время Форбуш-понижений изменение полного сопротивления ионосфера – Земля составляет не более 10%, что приводит к уменьшению  $E$  вблизи поверхности Земли примерно на такую же величину. Во время прихода солнечных космических лучей (СКЛ) проводимость значительно изменяется на больших высотах, а общее сопротивление изменяется незначительно. Это связано с тем, что в подавляющем большинстве случаев солнечные протонные события характеризуются очень мягким энергетическим спектром и ограничиваются энергией меньше 500 МэВ. Частицы таких энергий поглощаются на достаточно больших высотах в атмосфере (выше 15 км) и, несмотря на значительное увеличение ионизации на этих высотах, сопротивление контура атмосфера – Земля изменяется не более чем на 5% в областях вторжения СКЛ и ограничивается высокими широтами

из-за действия геомагнитного обрезания, т.е. только в области геомагнитных широт больше 60°.

Аномальные события прихода СКЛ с энергиями вплоть до 10 ГэВ чрезвычайно редки, а их продолжительность составляет не более 1–2 ч. Таким образом, для подавляющего большинства событий прихода СКЛ, так же как и для периодов выпадения частиц из радиационных поясов во время геомагнитных возмущений, полное сопротивление ионосфера – Земля практически не изменяется. Следовательно, изменениями проводимости невозможно объяснить значительное по величине (более 100%) возрастание  $E$  вблизи поверхности Земли, наблюдаемое в области полярных широт [34–37]. Согласно данным измерений параметров атмосферного электричества во время прихода аномально больших потоков солнечных космических лучей ток возрастает примерно в 2 раза.

В работе Рейтера [34], по данным измерений на Цугшпитце, было показано, что после солнечных вспышек ток и напряженность электрического поля возрастают в среднем примерно в 1,5 раза. За счет изменения проводимости, вызванного приходом СКЛ, невозможно обеспечить такие величины наблюдаемых эффектов.

В работе [38] было показано, что влияние СКЛ на электрические характеристики атмосферы при значительных потоках СКЛ не сводится только к изменению проводимости (присущее ГКЛ), как это трактуется в большинстве работ, а будут иметь место принципиально другие эффекты, обусловленные вторжением заряженных частиц в атмосферу и, в частности, внесением соответствующего заряда в зависимости от их энергии и интенсивности.

## **6. Механизм влияния атмосферного электричества на климатические характеристики тропосферы**

В серии работ [39–41] рассматривается возможность влияния галактических космических лучей и межпланетного магнитного поля на циркуляцию тропосферы через электрическое поле атмосферы. В этих работах предложен механизм, посредством которого изменения солнечной активности могут приводить к крупномасштабным изменениям атмосферной циркуляции. Согласно этому механизму солнечный ветер модулирует галактические космические лучи и магнитосферную конвекцию. Это приводит к изменениям ионосферного потенциала и тока ионосфера–Земля, к усилению поляризации облаков (имеющих большую горизонтальную протяженность) и накоплению положительного заряда на каплях вблизи вершин облаков. Заряженные капли (кристаллы) резко усиливают скорость роста капель (кристаллов), при этом выделяется «скрытая теплота». Выделение теплоты приводит к изменениям термобарического поля тропосферы и атмосферной циркуляции.

Однако при всей привлекательности этого механизма он представляется достаточно сложным, а главное, до настоящего времени отсутствуют количественные оценки его влияния на изменение климата.

В работе [38] предложен механизм влияния вариаций электрического поля на характеристики атмосферы. Данные высотных измерений для условий ясной погоды показывают наличие тесной связи между распределением по высоте ядер конденсации и электрическим полем атмосферы. Поэтому изменения глобального электрического поля с необходимостью будут приводить к изменению вертикального профиля электрического поля и соответствующему перераспределению по высоте ядер конденсации.

Механизм заключается в том, что на высотное распределение в тропосфере заряженных ядер конденсации оказывает решающее влияние вертикальный электрический потенциал ионосфера–Земля. В отсутствие гелиогеофизических возмущений этот потенциал определяется 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, выпасающиеся из радиационных поясов, и солнечные космические лучи.

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, которая приводит к изменению радиационного баланса, уменьшению радиационного выхолаживания и изменению термобарического поля тропосферы.

Изменения электрического поля будут оказывать воздействие на заряженные частицы в тропосфере и, следовательно, приводить к перераспределению по высоте аэрозолей, которые могут являться ядрами конденсации в атмосфере. Нетрудно оценить, какие заряженные аэрозоли будут заметно перемещаться по высоте за счет изменений напряженности электрического поля  $E$  в земном поле тяжести из условия равенства гравитационной и электрических сил, действующих на частицу аэрозоля:

$$mg = qE,$$

где  $m = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$  – масса частицы;  $q$  – заряд частицы.

Для реально наблюдаемой величины изменений электрического поля в нижней тропосфере (1–3 км)  $E = 10 \div 100$  В/м существенному воздействию будут подвергаться заряженные аэрозоли (так же, как и ионы) размером меньше 0,5 мкм. Согласно наблюдательным данным аэрозоли именно таких размеров соответствуют максимуму в распределении аэрозолей по размерам в атмосфере. Частицы аэро-

золей такого размера называются метеорологическими, и они наиболее активно влияют на процесс конденсации водяного пара в атмосфере.

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

а) от высотного профиля влагосодержания и температуры;

б) от первоначального распределения ядер конденсации по высоте в момент возмущения;

в) от вертикального турбулентного перемешивания.

Наибольшее влияние на состояние климатической системы данный механизм будет оказывать в то время, когда отсутствует приходящий поток энергии (высокоширотные области в зимний период). В этом случае любая облачность приводит к уменьшению потерь энергии климатической системой, в то время как при наличии приходящего потока влияние облачности на климатическую систему оказывается очень сложным и неоднозначным. Это связано с описанием сложных и неоднозначных обратных связей в глобальных климатических моделях. Обратные связи либо усиливают, либо подавляют начальное возмущение в климатической системе. Кроме того, значительное влияние на результаты моделирования оказывает изменение глобальной циркуляции атмосферы.

## 7. Анализ термобарического поля тропосферы в период аномального гелиофизического события

На основе данных Реанализа в работе [38] были изучены вариации термобарического поля атмосферы для периодов вторжения аномально больших потоков в июле 2000 г. (рис. 18).

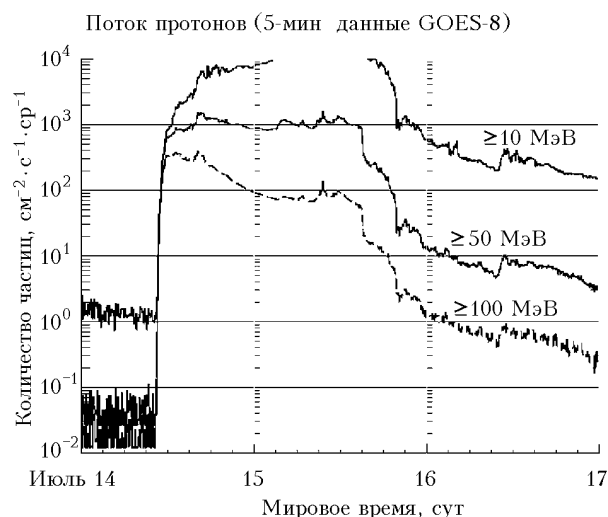


Рис. 18. Вариации потоков солнечных протонов с энергией 10, 50, и 100 МэВ по данным спутника GOES-8 в период 14–17 июля 2000 г.,

Наиболее чувствительной к вторжению частиц оказалась высота уровня 500 гПа. Сильнее

всего эффект вторжения СКЛ проявляется в Южном полушарии (местная зима) в области широт 50–70°. Максимальная величина эффекта наблюдается на 3-и–5-е сут. На рис. 19,а приведена карта динамики изобарической поверхности 500 гПа от 14 к 23 июля 2000 г., т.е. от момента вторжения до момента максимальных изменений. Для сравнения на рис. 19,б приведена аналогичная карта в отсутствие гелиогеофизических воз-

мущений (минимум солнечной активности 14–23 августа 1987 г.).

Очевидно, что изменения уровня изобарической поверхности 500 гПа в обширных высокоширотных зонах, расположенных на значительных расстояниях друг от друга по долготе, происходят синхронно. Это свидетельствует о том, что такие изменения контролируются гелиогеофизическими факторами, а не естественными синоптическими процессами.

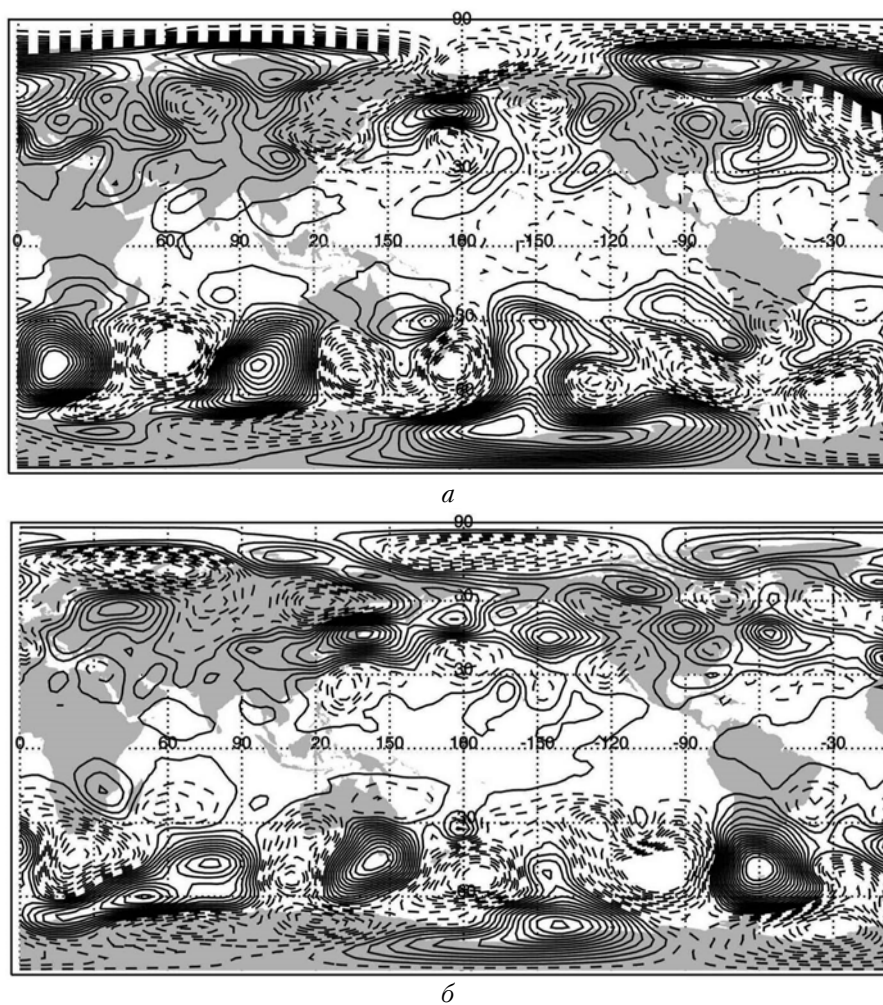


Рис. 19. Динамика изобарической поверхности 500 гПа от 14 к 23 июля 2000 г. (а) и 14–23 августа 1997 г. (б)

Известно, что во время возмущений геомагнитного поля происходит высыпание потоков заряженных частиц (электроны и протоны) из радиационных поясов. Это также будет приводить к изменению потенциала ионосфера–Земля. Вследствие этого, согласно рассмотренному выше механизму, происходит перераспределение по высоте заряженных аэрозолей, приводящее к образованию облаков в областях с достаточным содержанием водяного пара. Образовавшиеся облака воздействуют на радиационный баланс, уменьшая поток уходящей длинноволновой радиации, и приводят к изменениям термобарического поля.

Данные наблюдений полностью подтверждают вышеизложенный сценарий. В работе [42] установлена связь между ионосферными возмущениями и изменениями давления на уровне моря над Арктикой, и обнаружено, что реакция может быть сильнее или слабее в зависимости от начальных условий.

В рамках предложенного механизма, в принципе, удастся понять и объяснить найденные связи различных характеристик солнечной и геомагнитной активности с параметрами тропосферы:

– изменение структуры поля приземного давления после геомагнитных бурь;

– эффекты влияния солнечных космических лучей малых энергий ( $E = 100$  МэВ);

– связи распределения различных гелиогеофизических характеристик относительно пересечения секторной границы межпланетного магнитного поля с индексами завихренности атмосферы VAI и др.

### Выводы

Существует значимая корреляция между облачностью нижнего яруса (согласно современным спутниковым данным) и потоком галактических космических лучей. Однако объем этого массива данных невелик, поэтому возникает много неопределенностей при попытке установить долговременный ход развития облачности.

Физический механизм, обеспечивающий влияние солнечной активности на погоду и климат, сводится к регулированию (модуляции) потока энергии, уходящего от Земли в космос. Это своего рода клапан, определяющий условия радиационного баланса в атмосфере и оказывающий влияние на глобальную циркуляцию.

Значительную часть потепления в прошлом столетии можно количественно отнести за счет влияния солнечной переменности. Однако начиная с 60-х гг. по настоящее время при сохранении влияния солнечной переменности наблюдается явное воздействие другого фактора, роль которого непрерывно возрастает и в последнее десятилетие уже превышает вклад солнечной изменчивости.

Связующим звеном в солнечно-тропосферных связях являются космические лучи и электрическое поле атмосферы, которые подвержены влиянию солнечной переменности и могут оказывать значительное влияние на радиационный баланс атмосферы посредством воздействия на распределение в атмосфере ядер конденсации, фазовое состояние воды в атмосфере, облачный покров и в конечном итоге на радиационный баланс и атмосферную циркуляцию.

Количественный вклад влияния вариаций космических лучей и параметров атмосферного электричества в радиационный баланс и общую циркуляцию атмосферы и соответственно на погоду и климат предстоит еще определить.

Есть все основания считать, что в ближайшие несколько десятилетий (около 40 лет) влияние гелио-космических факторов на климат как в глобальном, так и в региональном масштабах будет ослабевать и частично компенсировать возможный вклад антропогенного влияния на климат. На более коротких временных интервалах весьма вероятно расхождение в поведении этих величин.

1. Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазун А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Лыжосов В.Н. Чувствительность климатической системы к малым внешним воздействиям // Метеорол. и гидрол. 2004. № 4. С. 77–92.
2. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.

3. Fröhlich C. Solar irradiance variations // Solar variability as an input to the Earth's environment. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium, 23–28 June 2003, Tatranská Lomnica, Slovak Republic. Ed.: A. Wilson. ESA SP-535, Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-845-X, 2003. P. 183–193.
4. Головкин В.А., Пахомов Л.А., Успенский А.Б. Глобальный мониторинг составляющих радиационного баланса Земли со спутников «Метеор-3» и «Ресурс-01» // Метеорол. и гидрол. 2003. № 12. С. 56–72.
5. Levitus S., Antonov J.I., Boyer P.T., Stephens C. Warming of the World Ocean // Science. 2000. V. 287. N 5461. P. 2225–2229.
6. Levitus S., Antonov J.I., Wang J., Delworth T.L., Dixon K.W., Broccoli A.J. Anthropogenic warming of earth's climate system // Science. 2001. V. 292. N 5515. P. 267–270.
7. Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селиги. М.: Мир, 1982. С. 382.
8. Cubasch U. Sun, Man, and Climate // Max Planck Research, Science Magazine of the Max Planck Society. 2002. V. 1. P. 78–83.
9. Авдюшин С.И., Данилов А.Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // Геомагн. и аэроном. 2000. Т. 40. № 5. С. 3–14.
10. Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // J. Atmosph. and Sol.-Terre. Phys. 2000. V. 62. P. 1563–1576.
11. Дергачев В.А., Распопов О.М. Долговременные процессы на Солнце, определяющие тенденции изменения солнечного излучения и поверхностной земной температуры // Геомагнетизм и аэрон. 2000. Т. 40. № 3. С. 9–14.
12. Ring D. The Sun's role in climate variations // Science. 2002. V. 296. N 5568. P. 673–677.
13. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А. Исследование влияния гелио-космических факторов на изменение окружающей среды // Тр. Междунар. конф. «Байкал – как участок мирового наследия». Результаты наблюдений и исследований. Улан-Уде, 1998; Новосибирск, 1999. С. 147–159.
14. Robertson A., Overpeck J., Rind D., Mosley-Thompson E., Zielinski G., Lean J., Koch D., Penner J., Tegen I., Healy R. Hypothesized climate forcing time series for the last 500 years // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106. N 14. P. 147835–14804.
15. Мустель Э.З., Мулюкова Н.Б., Четопруд В.Е. О солнечно-тропосферном эффекте в северном и южном полушариях Земли // Научные информации. Рига, 1990. Вып. 68. С. 99–117.
16. Friis-Christensen E., Lassen K. Length of solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate // Science. 1991. V. 254. P. 698–700.
17. Коваленко В.А., Юдина М.В. Влияние глобальной циркуляции на стационарирование Сибирского антициклона // Тр. Байкальской молодежной школы по фундаментальной физике. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2001. С. 490–495.
18. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А. Проявление глобальных изменений в климатических характеристиках

- Прибайкалья // Исслед. по геомагнетизму, аэрон. и физике Солнца. 2001. Вып. 113. С. 172–177.
19. *Израэль Ю.А., Груза Г.В., Катцов В.М., Мелешко В.П.* Изменение глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорол. и гидрол. 2001. № 5. С. 5–12.
  20. *Коваленко В.А., Молодых С.И.* Долговременные вариации элементов радиационного баланса земной атмосферы и интенсивности космических лучей // Исслед. по геомагнетизму, аэрон. и физике Солнца. 1999. Вып. 106. С. 110–118.
  21. *Zherebtsov G.A., Kovalenko V.A., Kovadlo P.G., Molodykh S.I.* Some features of longterm variations of radiation balance elements in the Earth's atmosphere, and cosmic ray intensity // XXI General Assembly of IUGG. July 2–14, Boulder, Colorado, USA: Boulder, 1995. P. 232.
  22. *Марксон Р.* Атмосферное электричество и проблема связи между солнечной активностью и погодой // Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селеги. М.: Мир, 1982. С. 242–251.
  23. *Svensmark H., Friis-Christensen E.* Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage – A missing link in solar-climate relationship // J. Atmos. Sol. and Terr. Phys. 1997. V. 59. P. 1225–1232.
  24. *Kernthaler S.C., Toumi R., Haigh J.D.* Some doubts concerning a link between cosmic ray fluxes and global cloudiness // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. N 7. P. 863–865.
  25. *Sun R., Bradley R.S.* Solar influences on cosmic rays and cloud formation: A reassessment // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 14. P. 4211.
  26. *Palle Bago E., Butler C.J.* Sunshine Clouds and Cosmic Rays // Proc. of the 1st Solar and Space Weather Euroconference. 25–29 september 2000, Santa Cruz de Tenerife. Tenerife, Spain. 2000. P. 147–152.
  27. *Пивоварова З.И.* Вековой ход прямой солнечной радиации // Тр. ГГО. 1975. Вып. 338. С. 39–60.
  28. *Поляк И.И., Пивоварова З.И., Соколова Л.В.* К анализу длиннопериодных колебаний солнечной радиации // Тр. ГГО. 1980. Вып. 427. С. 55–63.
  29. *Житорчук Ю.В., Стадник В.В., Шанина И.Н.* Исследование линейных трендов во временных рядах солнечной радиации // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1994. Т. 30. № 3. С. 389–396.
  30. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Связь концентрации тропосферного аэрозоля над Западной Сибирью с солнечной активностью // Докл. РАН. 2000. Т. 373. № 2. С. 238–241.
  31. *Ролдугин В.К., Старков Г.В.* Изменения прозрачности атмосферы в 11-летнем цикле солнечной активности // Докл. РАН. 2000. Т. 370. № 5. С. 675–677.
  32. *Roble R.G.* On solar-terrestrial relationships in the atmospheric electricity // J. Geophys. Res. D. 1985. V. 90. N 4. P. 6000–6009.
  33. *Reagan J.B., Meyerott R.E., Evans J.E., Imhof W.L.* The effects of energetic precipitation on the atmospheric electric circuit // J. Geophys. Res. C. 1983. V. 88. N 6. P. 3869–3878.
  34. *Reiter R.* Atmospheric electricity activities of the institute for atmospheric environmental research // Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Atmospheric electricity. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2–7 September 1974. Darmstadt: Steinkopff, 1977. P. 759–796.
  35. *Gurnet D., Frank L.A.* Observed relationships between electric fields and aurora particle precipitation // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 145–154.
  36. *Michnowski S.* Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions // J. Geophys. Res. D. V. 103. N 12. P. 13,939–13,948.
  37. *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. D. 1994. V. 99. N 5. P. 10797–10806.
  38. *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Шаманский Ю.В.* Влияние гелиогеофизических факторов на электрические характеристики атмосферы // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству: Сб. науч. трудов. Владимир, 2003. Т. 1. С. 43–46.
  39. *Tinsley B.A.* I Correlation of atmospheric dynamics with solar activity: evidence for a connection via the solar wind, atmospheric electricity, and cloud microphysics // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N 6. P. 10375–10384.
  40. *Tinsley B.A.* Correlation of atmospheric dynamics with solar wind induced air-earth current density into cloud tops // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 29,701–29,714.
  41. *Tinsley B.A.* Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere // Space Sci. Rev. 2000. V. 94. P. 231–258.
  42. *Toth L., Szegedi S.* Relationships between ionospheric disturbances and charges of sea level pressure over the arctic // Proc. of the 1st Solar and Space Weather Euroconference. 25–29 september 2000, Santa Cruz de Tenerife. Tenerife, Spain. 2000. P. 529–531.

**G.A. Zherebtsov, V.A. Kovalenko, S.I. Molodykh. Radiation budget of the atmosphere and climatic manifestations of solar variations.**

Combined analysis of long-term variations of radiation budget elements, global cloudiness, intensity of galactic cosmic rays, near-surface air temperature, and characteristics of solar activity has been carried out. Satellite and ground-based data on variations of cloudiness and solar irradiance have been summarized. The most data indicate that total cloudiness increases, on average, for the last century or, at least, last decades.

The energy budget of the Earth's climatic system has been calculated, and changes in the heat content of the World Ocean and the atmosphere for the last 50 years have been estimated. According to the estimates, only a minor part (~0.1%) of the incident energy goes for changing the heat content of the atmosphere and the ocean. The possible effect of changes in the solar constant on the energy budget of the atmosphere is discussed. The analysis of experimental data shows that, on the one hand, the radiative flux coming to the Earth decreases and, on the other

hand, the heat content of the World Ocean, land, and atmosphere obviously increases. This suggests that the most significant factors for the Earth's energy budget are variations of the outgoing longwave radiation, rather than variations of the net energy flux coming to the Earth.

Possible mechanisms of sun–climate relations, which can play an important role on both short and long time intervals, are discussed. The roles of cosmic rays and the electric field of the atmosphere, which, on the one hand, are subject to solar variations and, on the other hand, can influence considerably the radiation budget of the atmosphere by affecting the atmospheric distribution of cloud condensation nuclei, phase state of water in the atmosphere, cloud cover, etc., are considered.