

Астрономические факторы в долговременной эволюции климата Земли

И.В. Дворецкая¹, Г.М. Крученицкий², Г.Г. Матвиенко³, И.И. Станевич^{4*}

¹Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт
г. Киев, просп. Науки, 37, Украина

²Центральная аэрологическая обсерватория

141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3, Россия

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

⁴Московский физико-технический институт
141700, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9, Россия

Поступила в редакцию 18.11.2013 г.

Проанализирована концепция антропогенной обусловленности наблюдаемых глобальных климатических изменений. Показано, что недостатки современных подходов к моделированию глобального климата принципиально неустранимы, что делает невозможными получение с их помощью сколько-нибудь обоснованных выводов и предсказаний. Предложена альтернативная малопараметрическая энергобалансовая модель глобальной температуры и с ее помощью выполнена оценка сравнительного вклада основных парниковых газов в ее изменчивость. Обоснован перечень дополнительных факторов, включая астрономические, которые необходимо учитывать при анализе и диагностике наблюдаемых долговременных изменений средней глобальной температуры.

Ключевые слова: климат, глобальное потепление, динамическое моделирование, относительная эффективность парниковых газов, приливные эффекты, вырождение орбиты Земли; climate, global warming, dynamic modeling, relative greenhouse gas efficiency, tidal effects, Earth's orbit degeneration.

1. Постановка задачи

Современное состояние климатической системы Земли вызывает интерес и озабоченность не только специалистов, но и широкой общественности. Наиболее распространенным диагнозом этого состояния, положенным в основу Киотского протокола, является следующий набор утверждений [1]:

1) В последние годы имеет место беспрецедентное повышение глобальной температуры, которое составило $(0,6 \pm 0,2)$ К за период 1860–2000 гг.

2) Это повышение обусловлено антропогенными выбросами в атмосферу парниковых газов, поглощающих тепловое (инфракрасное) излучение Земли (CH_4 , N_2O и т.д.) и в основном углекислого газа (CO_2), образующегося при сжигании углеродосодержащих топлив.

3) Дальнейшие антропогенные выбросы CO_2 вызовут неуклонное повышение его содержания в атмосфере и рост глобальной температуры.

Этот диагноз вызывает ряд вопросов, например:

– С какой точностью может быть определено среднегодовое значение глобальной температуры

с помощью наблюдательных средств существующей мировой сети?

– Каким флуктуациям может быть подвержена глобальная температура при заведомом отсутствии антропогенных воздействий?

– Как соотносятся изменения глобальной температуры, обусловленные наблюдаемым изменением содержания парниковых газов в атмосфере, с ее естественной стохастической изменчивостью?

Ответ на эти вопросы дан в работе [2]. Однако кроме перечисленных возникают вопросы и более общего плана, основанные на известных [3, 4] фактах истории климата:

– название Гренландии свидетельствует скорее не о том, что капитан открывателей – легендарный Эрик Рыжий страдал дальтонизмом, а о том, что в момент открытия этот остров был покрыт растительностью (а не льдом, как в последние века);

– в 1601 г. Днепр замерз в июле, а в августе по нему уже ездили на санях, как зимой;

– в первой половине 20-х гг. XIX в. имел место случай выпадения первого снега в Псковской области в ночь на 15 января.

Приведенные факты говорят о том, что в эволюции климатической системы Земли, по-видимому, имели место как вейвлетообразные (нерегулярные) аномалии, так и низкочастотные (долговременные)

* Ирина Витальевна Дворецкая (anjes@i.ua); Григорий Михайлович Крученицкий (omd@cao-ghms.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Илья Игоревич Станевич (ilya.stanevich@gmail.com).

периодические изменения. Поскольку данные регулярных и пространственно представительных метеонаблюдений, находящиеся в распоряжении исследователей [5] (при самых либеральных требованиях к регулярности и пространственной представительности), ограничены по времени снизу 1850 г., то для объяснения отмеченных выше фактов следует обратиться к модельным представлениям о долговременной эволюции климатической системы Земли.

Необходимо констатировать также, что при анализе и диагностике климатических изменений следует считаться со следующими бесспорными фактами:

1) Основу современной экономики многих государств на постсоветском пространстве составляет экспорт энергоносителей и энергоемкой продукции.

2) Ограничения на деятельность современной энергетики и обусловленные ею выбросы парниковых газов приемлемы для этих государств только при условии бесспорных доказательств их негативного влияния на климат.

3) Слабость или даже полное отсутствие таких доказательств (точка зрения Президиума РАН, высказанная в ответе на запрос Президента РФ) должны быть максимально высвечены представителями РФ на международных переговорах климатозащитной направленности.

4) Защита интересов РФ на таких переговорах должна осуществляться профессионалами высокой квалификации, безусловно не ангажированными с помощью зарубежных грантов.

5) Защита интересов РФ должна стоять во главе угла при формировании Климатической доктрины, а не носить характер голословной декларации, практически незаметной на фоне безоговорочного принятия весьма спорных научных предпосылок Киотского протокола.

2. Выбор направления исследований

К сожалению, недостатки существующих моделей так многочисленны и велики, что их наличие признается даже самыми рьяными сторонниками этих моделей. Так, обзор [6] указывает в числе причин недоверия к существующим климатическим моделям:

- неудачные прогнозы погоды;
- публичные ошибки климатического прогнозирования, например ошибочное предсказание климатического коллапса в Британии на 2013 г.;
- неспособность существующих моделей реально отражать происходящие в климатической системе процессы;
- расхождение модельных оценок отдельных элементов климатической системы у разных авторов (читай: по прогнозам различных моделей);
- отсутствие уверенности в том, что в будущем сохранятся связи и взаимодействия, положенные в основу модели при ее составлении.

Но ни авторы обзора [6], ни другие апологеты существующих климатических моделей не понимают, что перечисленные причины есть следствие принципиально неустранимых недостатков этих моделей. Перечислим некоторые из этих недостатков.

Во-первых, уравнение глобальной циркуляции, т.е. уравнение Навье–Стокса во вращающейся системе координат, не обладает свойством единственности решения. Рассматривая проблему с позиций, существенно более общих, чем гидродинамические, В.И. Арнольд [7] установил, что если в начальный момент времени состояние погоды было нам известно с малой ошибкой ε , то порядок величины ошибки прогноза через n месяцев будет $\varepsilon \cdot 10^{kn}$, где $k \approx 2,5$. Отсюда следует, что успешно реализовать гидродинамический блок на современном уровне развития гидродинамики и теории приближенных вычислений НЕВОЗМОЖНО.

Во-вторых, нереализуемость на приемлемом уровне адекватности химического и радиационного блоков в климатических моделях детально обоснована в нашей работе [8]. Здесь ограничимся только указанием некоторых из причин этой нереализуемости. Для химического блока – это отсутствие сведений о глобальном распределении большинства малых газовых составляющих атмосферы, необходимых для адекватного задания начальных условий моделей и значительные неопределенности в величинах констант многочисленных химических реакций [10]. Для радиационного блока – это отсутствие сведений о глобальном распределении статистических и микрофизических параметров аэрозоля и ряд специфических трудностей, возникающих при численном решении уравнения переноса.

В-третьих, вопрос о программной реализации современных климатических моделей в целом чрезвычайно уязвим с весьма общей точки зрения. Дело в том что такая реализация представляет собой многие тысячи и даже десятки тысяч строк программного кода, при написании которого неизбежны ошибки. Как показывает опыт разработки программных проектов такого объема (например, очередных версий Windows или Microsoft Office), несмотря на высочайшую квалификацию разработчиков, основная масса ошибок, допущенных в ходе написания программного кода, выявляется через сотни тысяч человеко-лет эксплуатации, многие через миллионы человеко-лет, а некоторые – никогда. Поскольку полные объемы эксплуатации программной реализации современных климатических моделей на многие порядки уступают приведенным показателям, несомненно, что большая часть ошибок, допущенных в ходе написания программного кода, остается незамеченной.

Естественно, возникает вопрос об альтернативе подходам, применяемым в настоящее время при моделировании климатических процессов. В качестве такой альтернативы нами выбрано создание модели, содержащей малое число параметров и базирующейся на фундаментальных физических соображениях: в первую очередь на законе сохранения энергии. Простейшая модель глобальной температуры имеет вид

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left[\frac{1 - A(t)}{4r^2(t)} C_{\odot} - \sigma_B T^4 \exp\left(-\frac{T}{T_G(t)}\right) \right], \quad (1)$$

где T – среднеглобальная поверхностная температура; t – время; A – альбедо; r – расстояние до Солнца, отнесенное к своему среднему значению; C_{\odot} – плотность мощности потока солнечной энергии на среднем расстоянии планеты от Солнца; σ_B – постоянная Стефана–Больцмана; $T_G(t)$ – функция, описывающая зависимость коэффициента серости от температуры в различное время; α – константа, описывающая тепловую инерционность атмосферы.

Физический смысл уравнения (1) совершенно прозрачен. Если положить левую часть равной нулю и опустить множитель $\exp\left(-\frac{T}{T_G(t)}\right)$ во втором

члене правой части, то получим хорошо известное уравнение для радиояркостной температуры [9]. Экспоненциальный множитель описывает изменение коэффициента серости в зависимости от поглощения собственного теплового излучения парниковыми газами атмосферы. Показатель экспоненты пропорционален температуре за счет роста испарения (содержания водяного пара в атмосфере), а также за счет уменьшения растворимости CO_2 в океане, т.е. роста его содержания в атмосфере.

С учетом сказанного ясно, что уравнение (1) основано на простом предположении: скорость изменения среднеглобальной температуры планеты пропорциональна разности между средними плотностями потоков приходящего и уходящего от нее излучения.

3. Сравнение предложенной модели и результатов наблюдений

Начнем с вопроса о подборе параметров модели (1), которая бы позволила описать сезонный ход глобальной температуры, эмпирические значения которой дает популярный архив *crutem3* [5]. Для этого воспользуемся данными астрономических наблюдений за $r^2(t)$ и измерениями отражаемости земной поверхности с пространственным разрешением 1° широты и $1,25^\circ$ долготы, выполненными аппаратурой TOMS с борта космического аппарата (КА) *Nimbus-7* в 1978–1993 гг. и ее аналогом с борта КА *Earth Probe* в 1996–2003 гг. [11, 12]. Выбор периода наблюдений обусловлен тем обстоятельством, что именно эти данные были опубликованы в виде DVD-диска, т.е. прошли авторский контроль NASA.

Данные о расстоянии $r(t)$ между Землей и Солнцем, приведенные на сайте [12] за период 1959–2001 гг. с дискретностью 30 сут, вообще говоря, не являются периодическими, так как движение Земли реально отличается от кеплеровского за счет влияния других планет, а периоды их обращения вокруг Солнца несоизмеримы. Однако периодическая составляющая $r^{-2}(t)$ процесса, входящего в модель, составляет 99,94% от его полной изменчивости и представлена двумя первыми гармониками годового хода.

Полное альбедо Земли вычисляется зональным осреднением данных об отражаемости с последующим осреднением зональных данных с весами, пропорциональными площадям соответствующих широтных зон, т.е. косинусам центральных широт каждой зоны. Периодическая составляющая равна 85% от полной изменчивости альбедо и представлена пятью первыми гармониками годового хода. Более детальный анализ процесса $A(t)$ приведен ниже. Периодическая составляющая первого члена в уравнении модели (1) приведена на рис. 1.

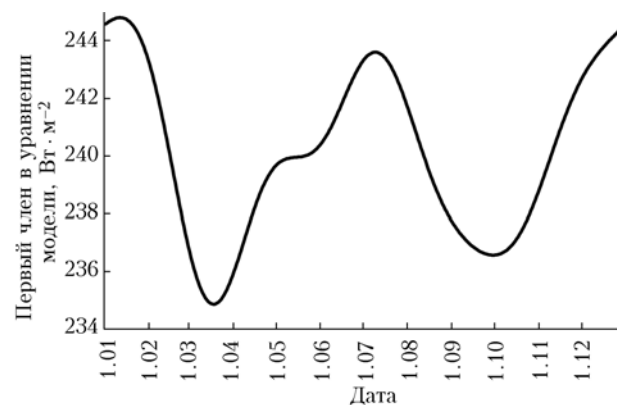


Рис. 1. Сезонный ход плотности нисходящей радиации

Ввиду того что величина $T_G(t)$ зависит от содержания парниковых газов в атмосфере и их сечений поглощения, которые, в свою очередь, зависят от температуры, ясно, что $T_G(t)$ также имеет сезонный ход. Из теоремы Фурье следует, что этот ход описывается суммой гармоник основного периода, т.е. года. Чтобы не перегружать модель излишними параметрами, было решено первоначально ограничиться представлением $T_G(t)$ в виде

$$T_G(t) = T_{G0} + T_{G1} \cos[\omega(t - t_{\max})], \quad (2)$$

где T_{G0} – постоянная составляющая $T_G(t)$, T_{G1} – амплитуда сезонной изменчивости $T_G(t)$; t_{\max} – фаза сезонной изменчивости $T_G(t)$.

Таким образом, остановились на четырех параметрах модели: T_{G0} , T_{G1} , t_{\max} и α . Подбор параметров осуществлялся по критерию минимизации расстояния в метрике l_2 между эмпирическими значениями сезонного хода глобальной температуры в соответствии с *crutem3* и решением уравнения (1). Значения параметров: $T_{G0} = 624,00$ К; $T_{G1} = 178,26$ К; $t_{\max} = 301,39$ юлианского дня (~10 ч 27 октября); $\alpha = 1,188 \cdot 10^{-8}$ К·м²·Дж⁻¹. Они обеспечивают согласие модельных и эмпирических данных (рис. 2).

Прежде чем анализировать качество построенной модели и следствия из нее, разберемся с тем, насколько физически осмысленными получились ее параметры. Сразу оговоримся, что недостаточная подробность имеющихся в нашем распоряжении экспериментальных данных позволяет оценить эту осмысленность только по порядку величины. Так,

значение параметра температурной инерционности α хорошо согласуется с динамическими диапазонами и характерными временами изменчивости нисходящего потока радиации и глобальной температуры (см. рис. 1 и 2). Несколько сложнее выглядит оценка естественности параметров сезонной изменчивости величины T_G , обусловленной сезонной изменчивостью оптической толщи парниковых газов в ИК-диапазоне. Как известно, эта толща формируется главным образом за счет водяного пара, углекислого газа и метана. Значения параметров T_{G1} и T_{G0} свидетельствуют, что отношение СКО сезонного хода оптической толщи к ее среднему значению составляет $\sim 20\%$ (рис. 3). Из рис. 4 и 5 ясно, что относительные сезонные вариации ИК оптической толщи метана и углекислого газа гораздо меньше 20% .

Оценить вариации ИК оптической толщи водяного пара гораздо сложнее, так как измерения вертикального распределения этого малого газового составляющего атмосферы обладают рядом особенностей. Считать отношение смеси для водяного пара константой (по высоте), как это допустимо для углекислого газа и метана (в диапазоне высот, где он в основном сосредоточен), невозможно [13]. Использовать данные аэрологического зондирования весьма нетривиально: датчики на мировой сети весьма разнообразны, их погрешности и условия применимости (прежде всего по нижнему пределу температуры) сильно разнятся между собой и получение сезонного хода глобальной ИК оптической толщи представляет собой весьма сложную задачу. Спутниковые профили счетной концентрации водяного пара начинаются с высот ~ 5 км.

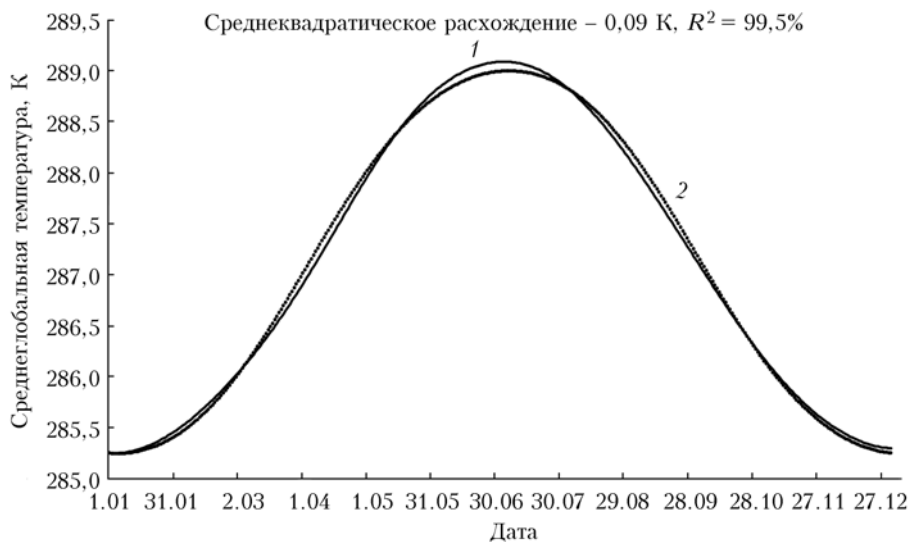


Рис. 2. Сравнение модельных (1) и эмпирических (crutem3) (2) данных о сезонной изменчивости глобальной температуры

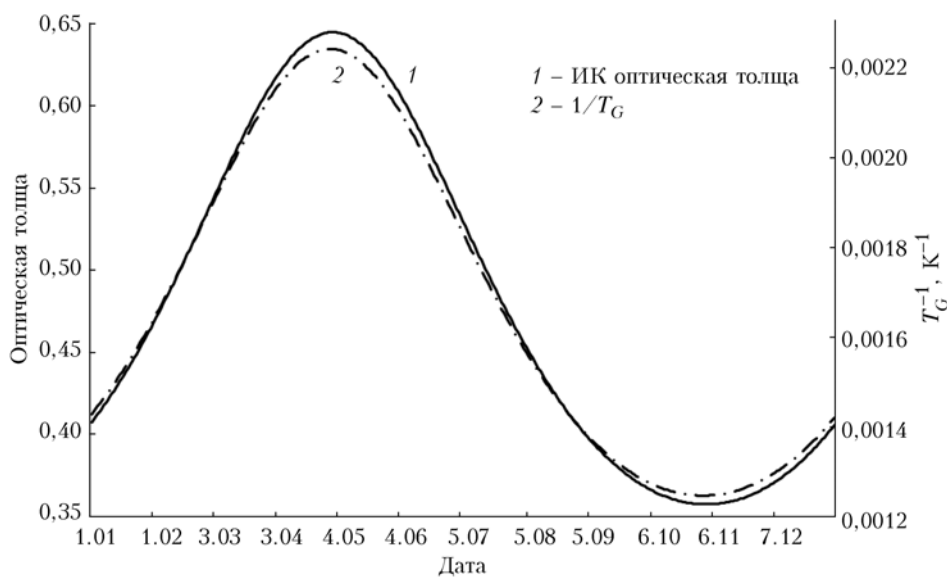


Рис. 3. Сезонный ход ИК оптической толщи

Ввиду сказанного мы ограничились лишь оценками по порядку величины, отдавая приоритет точности и однородности данных. Такие данные получают на ст. Болдер (США) в ходе аэрологического зондирования с уникальным датчиком влажности (криогенный измеритель точки росы). Этот датчик используется в качестве эталонного при сравнении результатов, полученных исследователями в разных странах, и признан в мире наиболее точным для измерений в широком диапазоне. Для оценки параметров сезонной изменчивости на основе архива измерений в Болдере [14] была создана база данных, рассчитано полное содержание водяного пара до высоты 25 км во всех выпусках и оп-

ределены параметры сезонной изменчивости полного содержания водяного пара.

Рис. 6 иллюстрирует качество регрессионной модели сезонной изменчивости, для которой статистически значимыми кроме постоянной составляющей оказались две первые гармоники годового хода, что обеспечило эффективность модели на уровне 76%. При этом отношение СКО сезонного хода общего содержания водяного пара к среднему значению составляет 58%. Разумеется, данные об отношении СКО сезонного хода общего содержания водяного пара к среднему значению, полученные в одной точке (да еще расположенной на высоте 1743 м), вряд ли можно считать представительными

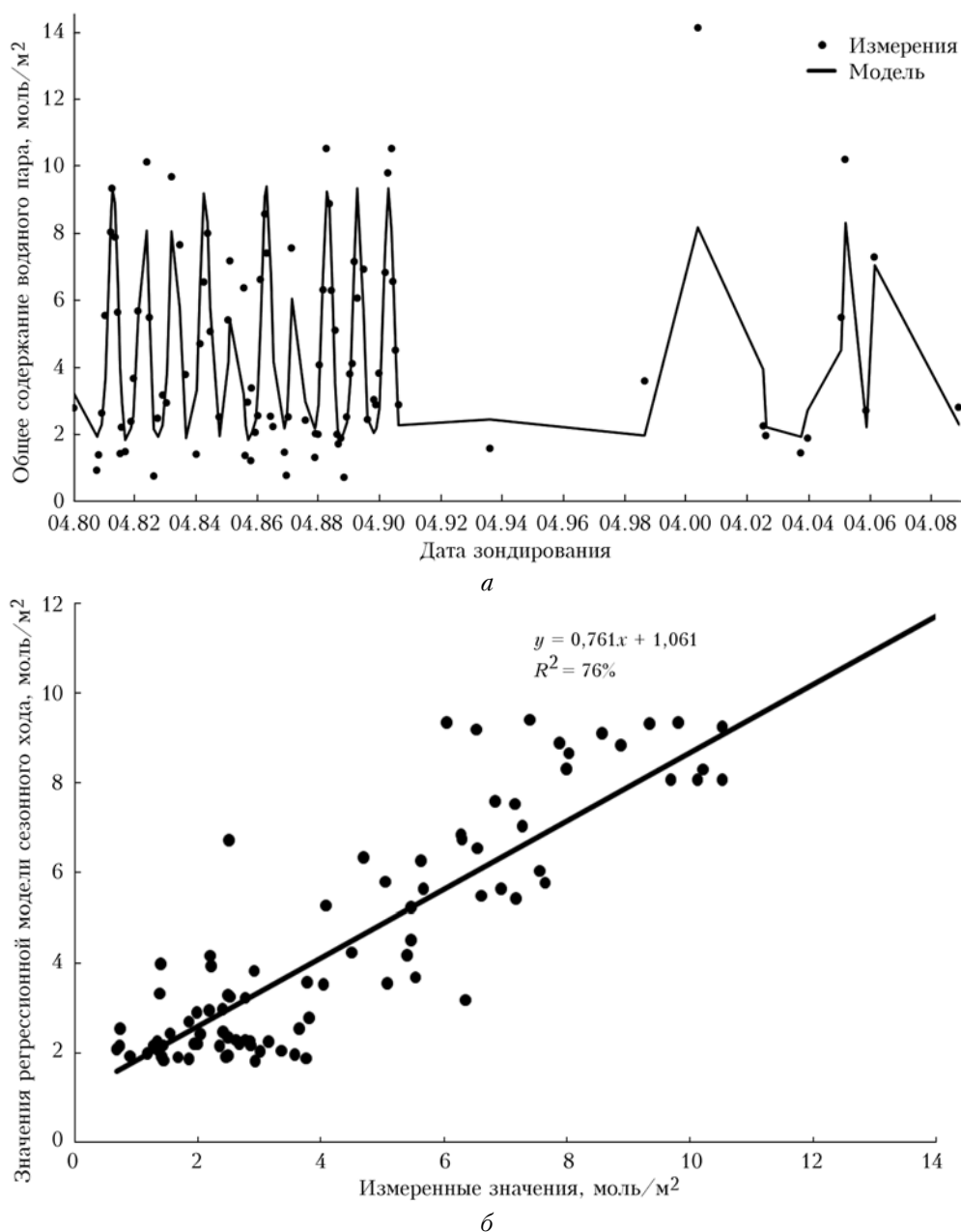


Рис. 6. Сравнение модели сезонной изменчивости общего содержания водяного пара с данными измерений: *a* – временной ход, *б* – фазовый портрет

для среднеглобальной величины оптической толщи атмосферы в ИК-диапазоне. Однако эти данные указывают на то, что использованное в предложенной модели значение (20%) по порядку величины не является противоречащим результатам измерений.

Модель (1) дает возможность комплексирования обнаружения изменения климатообразующих факторов, сводя эту задачу к обнаружению изменений в глобальных потоках нисходящей солнечной радиации оптического диапазона [первый член в уравнении (1)] и восходящей радиации ИК-диапазона, обусловленной собственным тепловым излучением Земли, частично поглощаемым парниковыми газами, содержащимися в ее атмосфере [второй член в уравнении (1)]. В терминах модели (1) это означает исследование вклада в долговременную эволюцию глобальной температуры остатков сезонного хода $A(t)$ и $T_G(t)$. Здесь необходимо сделать некоторые уточнения.

Прежде всего, отметим, что упомянутые остатки могут иметь как регулярную, так и стохастическую составляющие. Из приведенных выше оценок, в частности, очевидна малость вклада долговременных изменений CO_2 и CH_4 в оптическую толщину атмосферы в ИК-диапазоне по сравнению с естественными (стохастическими) вариациями сезонной изменчивости водяного пара, что ставит под сильнейшее сомнение научное обоснование антропогенной обусловленности глобальной потепления. Применительно к альбедо, очевидно, что заметный вклад в стохастическую составляющую могут вносить аэрозольные эффекты, обусловленные вулканическими выбросами микроскопических частиц пепла в стратосферу. Классический пример – извержение индонезийского вулкана Кракагау, заметно снизившего на протяжении нескольких лет глобальную температуру. Кроме того, в принципе, возможны долговременные однонаправленные изменения, например сопряженные с антропогенной деятельностью.

Рассмотрим периодическую изменчивость глобального альбедо $A(t)$, использованную при расчете сезонного хода потока нисходящей солнечной радиации (см. рис. 1). Параметры спектров сезонного хода с учетом гармоник, значимых на уровне 95% и более, приведены в табл. 1 и 2. При сравнении этих данных видно, что спектральный состав сезонной изменчивости глобального альбедо за период 1978–1993 гг. имеет ряд существенных и статистически значимых отличий.

Спектры отличаются большим значением постоянной составляющей и отсутствием третьей гармоники в более позднем из них, уменьшением амплитуды и фазы в первой гармонике, уменьшением амплитуды второй гармоники, а также возрастанием амплитуд четвертой и пятой гармоник при разнонаправленном изменении их фаз (для четвертой – уменьшение, для пятой – возрастание). Таким образом, все параметры спектров подвержены значимым отличиям, кроме фазы второй гармоники. Статистически значимыми, как видно из данных, приведенных на рис. 7, являются и различия значений параметров долговременной изменчивости.

Естественно, желательно объединить сезонную и долговременную изменчивость в рамках единой модели с высоким коэффициентом детерминации. Заметим, что коэффициент детерминации модели сезонного хода (по обоим КА) составляет 85%, что при объединении с трендом с коэффициентом детерминации 7% даст итоговую эффективность (коэффициент детерминации) 86%.

В настоящей работе применен алгоритм построения объединенной модели, основанный на аналогии с модулированным радиосигналом [15]. Сезонная изменчивость при этом играет роль несущей, а долговременная – огибающей [16]. Эффективность модели огибающей при выборе периода ее первой гармоники равным 37,2 года оказалась 56%-й, а итоговой объединенной (мультипликативной) модели – 93%-й. Это обстоятельство иллюстрирует рис. 8.

Таблица 1

Амплитуды статистически значимых гармоник в спектре сезонного хода глобального альбедо и погрешности их вычисления

Космический аппарат	Амплитуда					
	Гармоника					
	0	1	2	3	4	5
Оба КА	$0,2971 \pm 0,0005$	$0,022 \pm 0,0007$	$0,0111 \pm 0,0007$	$0,0015 \pm 0,0007$	$0,0026 \pm 0,0007$	$0,0017 \pm 0,0007$
N7	$0,2938 \pm 0,0003$	$0,0247 \pm 0,0005$	$0,0116 \pm 0,0005$	$0,0018 \pm 0,0005$	$0,0024 \pm 0,0005$	$0,0014 \pm 0,0005$
EP	$0,3037 \pm 0,0006$	$0,017 \pm 0,0009$	$0,0103 \pm 0,0009$	0	$0,0036 \pm 0,0009$	$0,0024 \pm 0,0009$

Таблица 2

Фазы статистически значимых гармоник в спектре сезонного хода глобального альбедо и погрешности их вычисления

Космический аппарат	Фаза				
	Гармоника				
	1	2	3	4	5
Оба КА	29 ± 1	69 ± 1	68 ± 7	36 ± 3	16 ± 4
N7	30 ± 0	69 ± 1	69 ± 4	39 ± 2	13 ± 4
EP	26 ± 1	69 ± 1	–	31 ± 3	19 ± 4

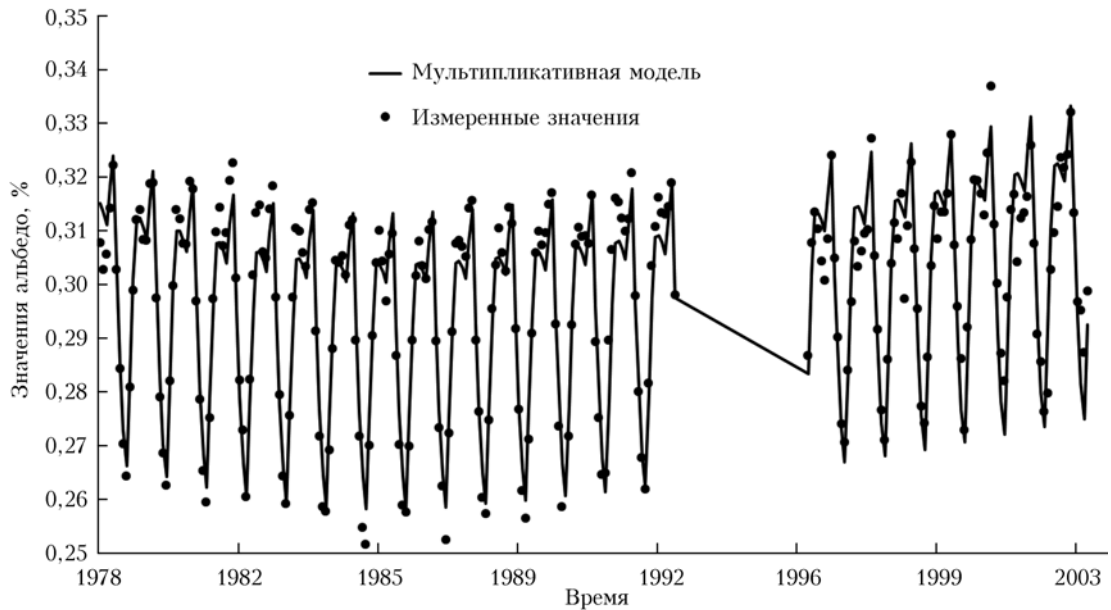


Рис. 8. Объединенная модель сезонной и долговременной изменчивости альбедо (сплошная линия); экспериментальные данные (точки)

Число значимых (на уровне не менее 95%) гармоник оказалось при этом равным двум. Поиски ответа на вопрос о том, какая физическая причина обуславливает наличие в спектре долговременной изменчивости колебания с основным периодом 37,2 года, приводят к следующему предположению. Как известно [17], приливные колебания в Мировом океане имеют долгопериодную изменчивость с периодом 18,6 года. Физически это обусловлено наличием колебаний с тем же периодом плоскости орбиты Луны относительно плоскости эклиптики. Эти колебания сильно выражены и легко обнаруживаются по данным прямым измерений [18].

Естественно предположить, что долгопериодные колебания альбедо (а следовательно, и нисходящего потока солнечной радиации видимого диапазона, достигающей поверхности Земли) с вдвое большим периодом (37,2 года) обусловлены параметрическим резонансом с медленными изменениями приливного режима. Интенсивность приливных колебаний влияет на температуру активного слоя океана, что, в свою очередь, регулирует интенсивность испарения с океанической поверхности и режим образования облаков, формирующих альбедо. Кроме того, климатическая значимость приливов обусловлена и тем обстоятельством, что они регулируют эффективность теплообмена Гольфстрима с водами Северного Ледовитого океана [19].

4. Астрономические факторы долговременной изменчивости климата

Трудно предположить, что обусловленные приливными эффектами колебания альбедо являются единственным проявлением влияния астрономических факторов на климат. «Сверхдолговременные» проявления действия таких факторов (с ха-

рактерными временами 10^4 – 10^5 лет) известны по меньшей мере со времен классической работы [20]. Более быстрые проявления влияния астрономических факторов, в частности возмущения орбитальных характеристик Земли, вновь привлекли к себе внимание [21].

В последнее время внимание исследователей также привлекло и влияние аэрозоля метеоритного происхождения на энергетический баланс климатической системы Земли [22]. Один из основных выводов работы [20] состоит в том, что форма земной орбиты осциллирует с характерным временем $\sim 10^5$ лет от квазикруговой (с максимальной средней глобальной температурой) до сильно вытянутой (с минимальной средней глобальной температурой). Этот эффект объясняется вторым законом Кеплера: на вытянутой орбите большую часть времени планета проводит на ее удаленных от Солнца участках.

Учет вклада изменения формы орбиты в наблюдаемую изменчивость глобальной температуры требует точного расчета долговременной эволюции Солнечной системы в целом. Такой расчет для периода 2000 лет был выполнен на основе метода Гаусса–Эверхарта [23] и дал следующие результаты. На протяжении всего периода орбита Земли приближается к круговой, величина ее видности

$$V = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}},$$

где R_{\max} и R_{\min} — соответственно

максимальное и минимальное расстояния до Солнца на протяжении одного оборота, монотонно уменьшается. Это уменьшение носит на анализируемом промежутке времени характер линейного тренда, составляющего 99,4% от полной изменчивости видности за 2000 лет и 49,8% от ее полной изменчивости за время с 1850 г. (период инструментальных наблюдений за температурой). Исключение вклада этого процесса в линейный тренд глобальной температуры приводит к его уменьшению

более чем в 2 раза, а его статистической значимости более чем в 3 раза (рис. 9).

Оценка долговременной изменчивости индекса глобальной температуры (ИГТ) с помощью линейного тренда была выполнена исключительно для сравнения с данными международной группы экспертов, готовившей обоснование Киотского протокола, основанного на версии существования этого тренда (глобального потепления) и его антропогенной обусловленности. Данная версия представляет собой серьезнейшую угрозу государственным интересам России и была квалифицирована Президиумом РАН (в ответ на запрос Президента РФ) как не имеющая под собой научной основы.

Однако из рис. 9 видно, что долговременная изменчивость индекса глобальной температуры вряд ли сводится к линейному тренду. Для выяснения истинной природы этой изменчивости был исследо-

ван энергетический спектр остатков индекса глобальной температуры после исключения из него вклада вырождения орбиты. Спектр приведен на рис. 10, а соответствующая ему автокорреляционная функция (АКФ) остатков на рис. 11.

Спектр получен методом линейной регрессии АКФ на сумму колебаний, частоты которых определялись встроенным методом Excel – «Solver» (в русском интерфейсе «Поиск решения»). Физическая природа колебаний, амплитуды которых определены таким путем, ясна, исключая два колебания с периодами ~4,2 и ~15,1 года, природа которых должна составить предмет дальнейших исследований. Полученный спектр включает квазидвухлетние колебания зональной составляющей экваториального ветра (QBO) и их третью гармонику (QBO_3), период обращения Юпитера (J) и его третью гармонику (J_3), а также период великих противостояний

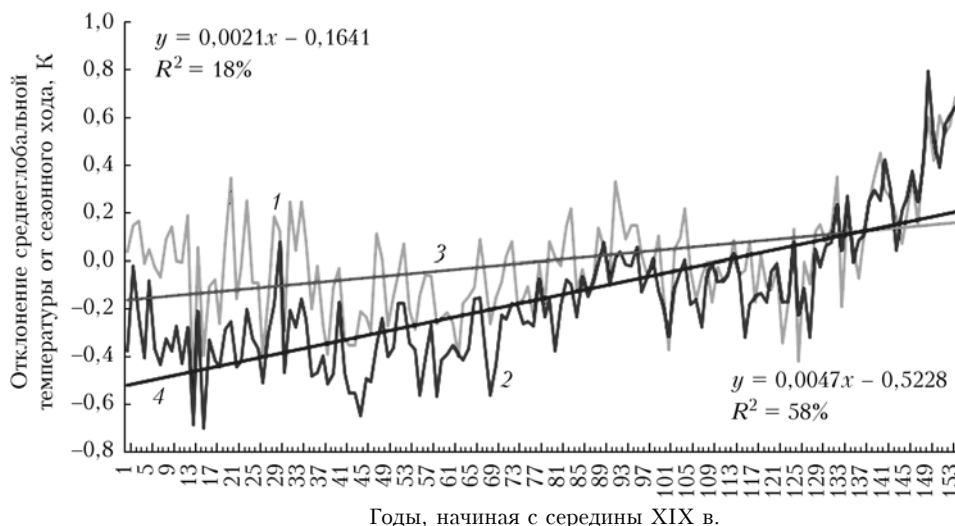


Рис. 9. Влияние учета регрессии глобальной температуры на видность орбиты на величину и статистическую значимость ее тренда: 1 – остатки регрессии отклонений глобальной температуры на видность орбиты Земли; 2 – отклонения глобальной температуры от сезонного хода; 3 – тренд с учетом регрессии; 4 – тренд без учета регрессии

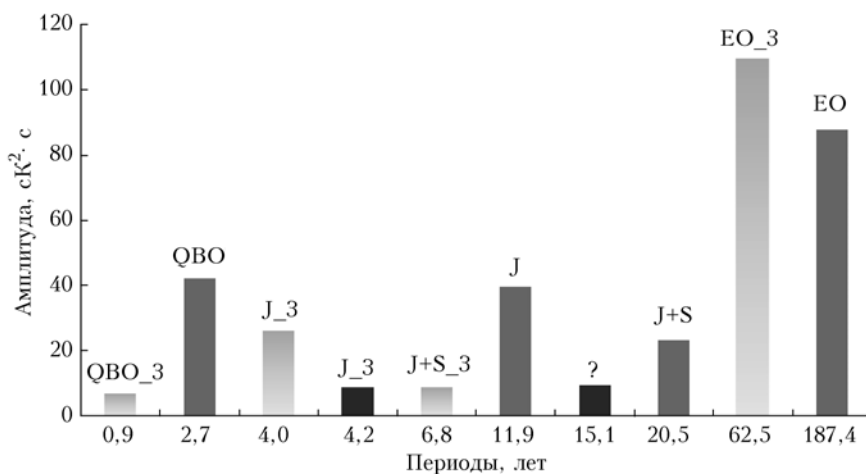


Рис. 10. Энергетический спектр остатков индекса глобальной температуры после исключения из него вклада вырождения орбиты

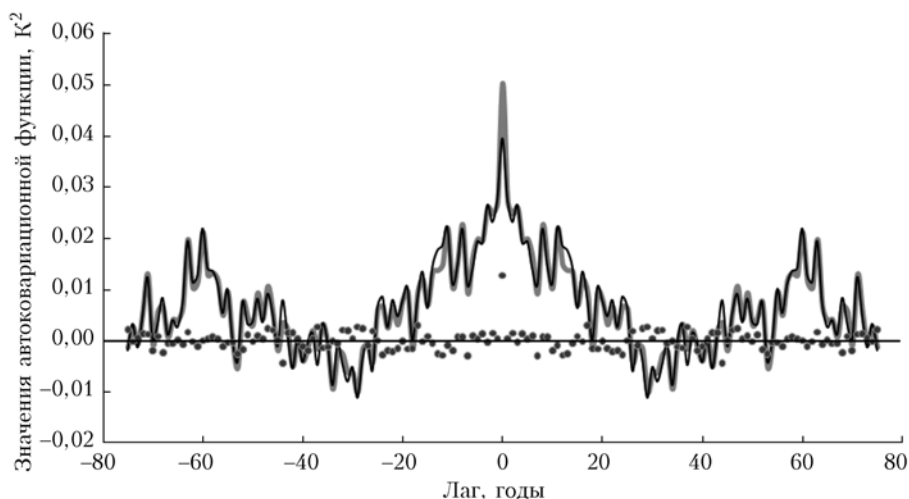


Рис. 11. Автокорреляционная функция остатков ИГТ после исключения из него вклада вырождения орбиты: серая кривая — АКФ; черная — ее модель ($R^2 = 97\%$); точки — остатки моделирования ($DW = 1,99$)

Юпитера и Сатурна (J+S) и его третью гармонику (J+S_3). Отметим, что колебание с наибольшей амплитудой EO_3 известно климатологам как *квазишестидесятилетнее* [23]. Сам факт присутствия третьих гармоник в спектре медленной изменчивости ИГТ, по-видимому, объясняется тем обстоятельством, что так как уходящий поток ИК-излучения пропорционален четвертой степени температуры, его изменчивость пропорциональна ее третьей степени.

Механизмы влияния перечисленных колебаний на ИГТ имеют следующую природу:

1. КДК (QVO) определяют интенсивность межполушарного обмена, что, в свою очередь, регулирует эффективность выравнивания температур между летним и зимним полушариями.

2. Известно, что Солнце, вращаясь вокруг своей оси, также обращается около центра масс всей Солнечной системы. Положение этого центра масс непостоянно и в каждый момент времени зависит от взаимного расположения планет (особенно больших — Юпитера и Сатурна). Расхождение положения центра масс Солнечной системы (центр Солнце) приводит к деформации фотосферы и изменениям диаграммы направленности солнечного излучения.

Перед тем как обратиться к выяснению природы колебания с наибольшим периодом (EO) и его третьей гармоники, отметим следующее:

1. Эффективность построенной модели АКФ составляет 97%, а остатки моделирования имеют значения статистики Дарбина—Уотсона (DW) 1,99, т.е. фактически представляют собой «белый» шум. Следовательно, ничего кроме колебаний, приведенных на рис. 11, долговременная изменчивость ИГТ не содержит. Прежде всего, отметим, что упомянутые остатки могут иметь как регулярную, так и стохастическую составляющие. На ИГТ может оказывать прямое влияние изменчивость альbedo Земли, заметный вклад в стохастическую составляющую которого могут вносить, как отмечено выше, аэро-

зольные эффекты. Что же касается регулярной составляющей, то она может представлять собой долгопериодное колебание или суперпозицию таковых. Очевидно, что если период наблюдения гораздо меньше периода такого колебания, то оно может быть ложно идентифицировано как линейный (если центр периода наблюдений недалеко отстоит от нулевой точки колебания, как мы убедились на примере видности орбиты) или параболический тренд (если центр периода наблюдений недалеко отстоит от экстремальной точки колебания, примером может служить альbedo Земли — черная линия на рис. 7).

2. Эффект наличия тренда имеет кажущийся характер и полностью обусловлен соотношением фаз упомянутых колебаний (в первую очередь долгопериодных).

Приступая к выяснению природы колебания ИГТ с наибольшим периодом (EO) и его третьей гармоники, обратим внимание на тот факт, что движение Луны, влияющее на интенсивность приливных колебаний в Мировом океане, должно оказывать влияние на ИГТ за счет вариаций эффективности контакта с атмосферным воздухом водяных масс с глубины, заметно отличающихся по температуре. АКФ косинуса угла между плоскостями орбит Луны и Земли приведен на рис. 12, а ее энергетический спектр на рис. 13.

Коэффициент детерминации модели, построенной аналогично модели АКФ остатков ИГТ, отличается от 100% на $10^{-6}\%$, причем спектр состоит всего из трех «быстрых» колебаний (самое медленное имеет период $T_3 \sim 18,6$ года и дает вклад на 2 порядка меньше, чем два более быстрых: $T_1 \sim 2,997$ и $T_2 \sim 9,277$ года). Тем не менее на рис. 12 явно просматриваются долговременные изменения с характерными временами порядка 100 и даже 1000 лет. Это обусловлено несоизмеримостью периодов колебаний, формирующих энергетический спектр процесса.

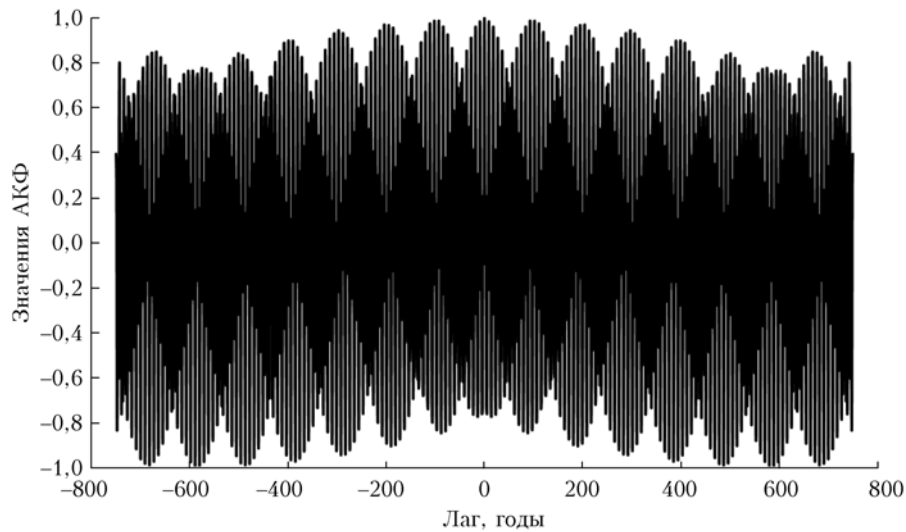


Рис. 12. АКФ косинуса угла между плоскостями орбит Земли и Луны

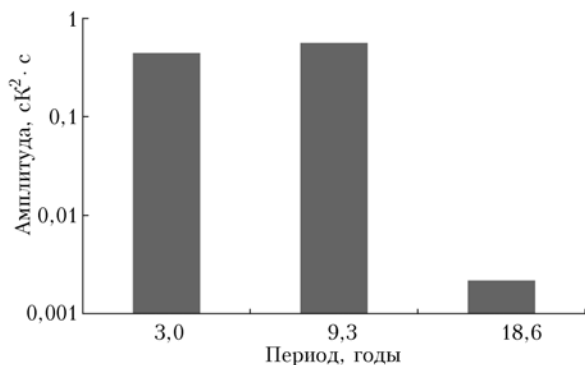


Рис. 13. Энергетический спектр АКФ косинуса угла между плоскостями орбит Земли и Луны

Судя по всему, ЕО имеет природу параметрического резонанса с изменениями порядка 100 лет. Косвенно наличие ЕО подтверждается тем, что, отсчитав его период от наших дней назад, мы попадаем во время действия романа Пушкина «Евгений Онегин» и описанной в нем климатической аномалии [4]. Наличие изменений с характерными временами порядка 1000 лет подтверждается наличием растительного покрова в Гренландии в эпоху ее открытия.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

Предложенная малопараметрическая энергобалансовая модель глобальной температуры позволила:

- рассчитать сезонный ход глобальной температуры с высокой точностью, совпадающий с данными наблюдений;

- обосновать доминирующий вклад водяного пара в формирование поглощающей оптической толщи атмосферы в ИК-диапазоне и пренебрежимо малый вклад долговременных изменений CO_2 и CH_4 в оптическую толщину атмосферы в ИК-диапазоне по сравнению с естественными вариациями сезонной изменчивости водяного пара;

- обосновать влияние на долгопериодную изменчивость глобальной температуры астрономических факторов, формирующих альбедо Земли.

Влияние астрономических факторов, формирующих альбедо Земли, на долгопериодную изменчивость глобальной температуры может осуществляться через 1) колебания плоскости орбиты Луны относительно плоскости эклиптики и 2) изменение глобальной аэрозольной обстановки за счет частиц метеоритного происхождения [20].

Исследования колебаний формы орбиты Земли как фактор, влияющий на изменчивость климата, показали, что на протяжении нашей эры происходит вырождение орбиты Земли, которое в свою очередь приводит к росту среднеглобальной температуры. Исключение регрессионного вклада вырождения орбиты из долговременной изменчивости индекса глобальной температуры приводит более чем к двукратному уменьшению значения положительного линейного тренда температуры за период наблюдений и более чем трехкратному уменьшению ее статистической значимости.

На основе анализа связи между движением Луны и изменчивостью ИГТ и полученного энергетического спектра параметра АКФ косинуса угла между плоскостями орбит Луны и Земли получены следующие результаты.

а) Спектр колебаний параметра состоит всего из трех «быстрых» колебаний (самое медленное имеет период $T_3 \sim 18,6$ лет и дает вклад на 2 порядка меньше, чем два более быстрых $T_1 \sim 2,997$ и $T_2 \sim 9,277$ года).

б) Коэффициент детерминации построенной модели составляет практически 100%.

в) Быстрые колебания с несоизмеримыми периодами в энергетическом спектре процесса могут вызвать в нем долговременные изменения с характерными временами, значительно превышающими эти периоды, что, в частности, объясняет существование периода климатического благоприятствования на рубеже первого и второго тысячелетий нашей эры.

г) Эффект наличия тренда в индексе глобальной температуры имеет кажущийся характер и полностью обусловлен соотношением фаз упомянутых колебаний.

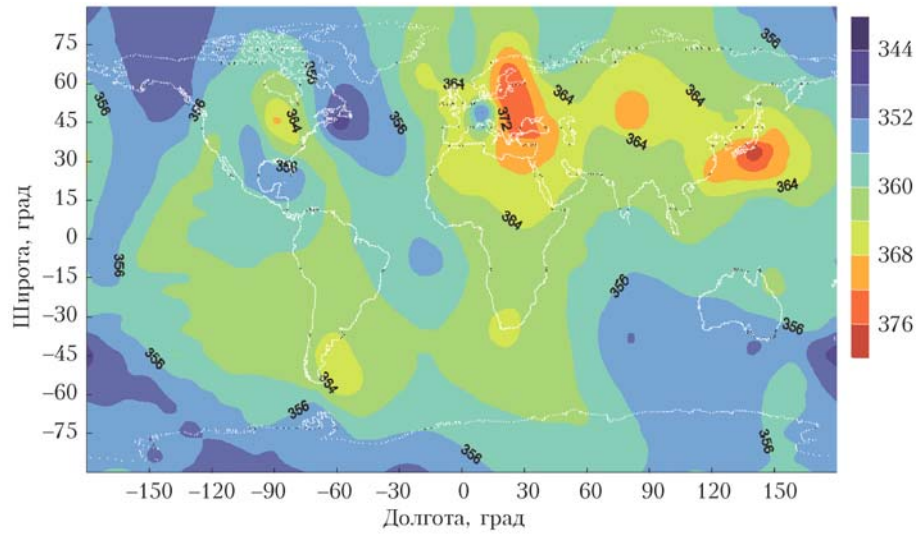
Таким образом, проведенное исследование приводит к выводу о том, что наблюдаемый рост глобальной температуры полностью обусловлен вкладом долгопериодных колебательных процессов, большинство из которых имеет астрономическую природу, и экспертная оценка Президиумом РАН научных основ Киотского протокола, как несостоятельных, полностью адекватна.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-05-010-36.

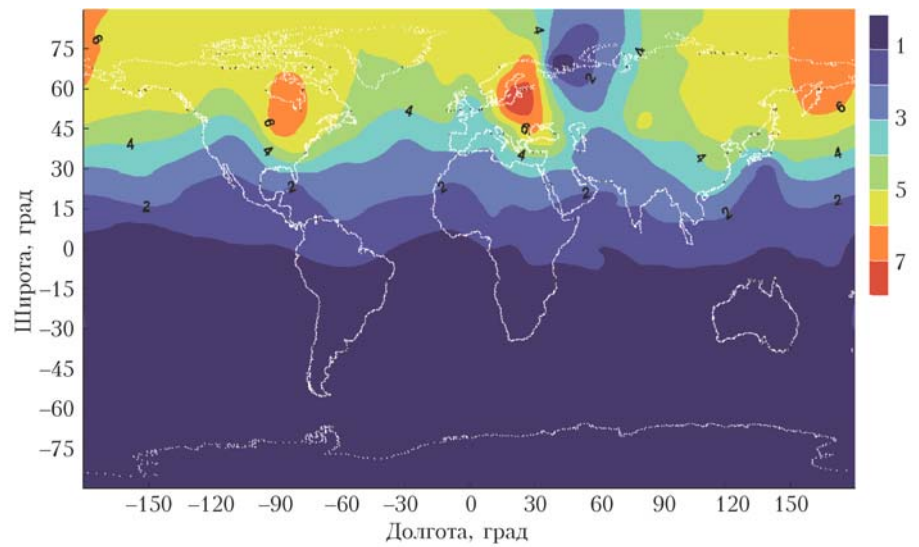
1. *Third Assessment Report – Climate Change 2001* (<http://www.ipcc.ch/>).
2. *Крученицкий Г.М.* Глобальная температура: потенциальная точность измерения, стохастические возмущения и долговременные изменения // *Оптика атмосф. и океана*. 2007. Т. 20, № 12. С. 1064–1070.
3. *Борисенков Е.П., Пасецкий В.М.* Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. М.: Мысль, 1988. 522 с.
4. *Лотман Ю.М.* Роман А.С. Пушкина «Евгений Онегин». Комментарий: Пособие для учителя. 2-е изд. Л.: Просвещение, 1983. 416 с.
5. *URL: http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/*
6. *Кароль И.Л., Киселев А.А.* Климатическая модель: инструмент или игрушка? // *Природа*. 2009. № 5. С. 25–31.
7. *Арнольд В.И.* Математические методы классической механики. М.: Наука, 1979. С. 307–308.
8. *Крученицкий Г.М., Галкина И.Л., Белявский А.В., Скоробогатый Т.В.* О принципиальных ограничениях в моделировании атмосферных процессов // *Труды Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института*. Киев, 2002. Вып. 250. С. 149–161.
9. *Бялко А.В.* Наша планета – Земля. М.: Наука, 1989. 220 с.
10. *Демидович Б.П.* Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967. С. 312–314.
11. *URL: http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/*
12. *URL: http://nssdc.gsfc.nasa.gov/*
13. *Атмосфера: Справочник*. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 76.
14. *URL: http://eosweb.larc.nasa.gov/GUIDE/dataset_documents/base_nvap_dataset*
15. *Мандельштам Л.И.* Лекции по теории колебаний. М.: Наука, 1972. С. 41–50.
16. *Кадыгров Н.Е., Крученицкий Г.М., Лыков А.Д.* Количественные оценки возмущений, вносимых мегаполисом в поле температуры атмосферного пограничного слоя // *Физ. атмосф. и океана*. 2007. Т. 43, № 1. С. 1–13.
17. *Марчук Г.И., Каган Б.А.* Динамика океанских приливов. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 359 с.
18. *Белокриницкая Л.М., Клок С.И., Крученицкий Г.М.* Исследование спектра приливных колебаний по данным измерений на станции «Академик Вернадский» // *Украинский антарктический журнал*. 2007/2008. № 6–7. С. 184–197.
19. *Сурдин В.Г.* Пятая сила. М.: Изд-во Московского центра математического образования, 2009. 7 с.
20. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л.: ГОНТИ; Ред. техн.-теорет. лит., 1939. 256 с.
21. *Шерстоков Б.Г.* Изменение, изменчивость и колебания климата. Обнинск: ФГБУ «ВНИИМИ-МЦД», 2011. С. 126–128.
22. *Кручиненко В.Г., Козак П.Н., Тарануха Ю.Г., Рожило А.А., Крученицкий Г.М., Козак Л.В., Ивченко В.Н., Белокриницкая Л.М.* Метеороиды как источник аэрозоля в верхней атмосфере // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 11. С. 957–966.
23. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. С. 149–152.

I.V. Dvoretzkaya, G.M. Kruchenitsky, G.G. Matvienko, I.I. Stanevich. Astronomic factors in the long-term evolution of the Earth's climate.

The concept of the dependence of observed global climatic changes on anthropogenic factors is analyzed. The limitations of modern approaches to global climate modeling are shown to be unremovable, which makes it impossible to arrive at grounded enough conclusions and predictions. An alternative parameter-reduced energy balance model of the global temperature is proposed, and the relative contribution of basic greenhouse gases to global temperature variability is estimated based on this model. A list of factors, including astronomic ones, to be additionally allowed for in analyzing and diagnosing the observed long-term changes in the mean global temperature is substantiated.

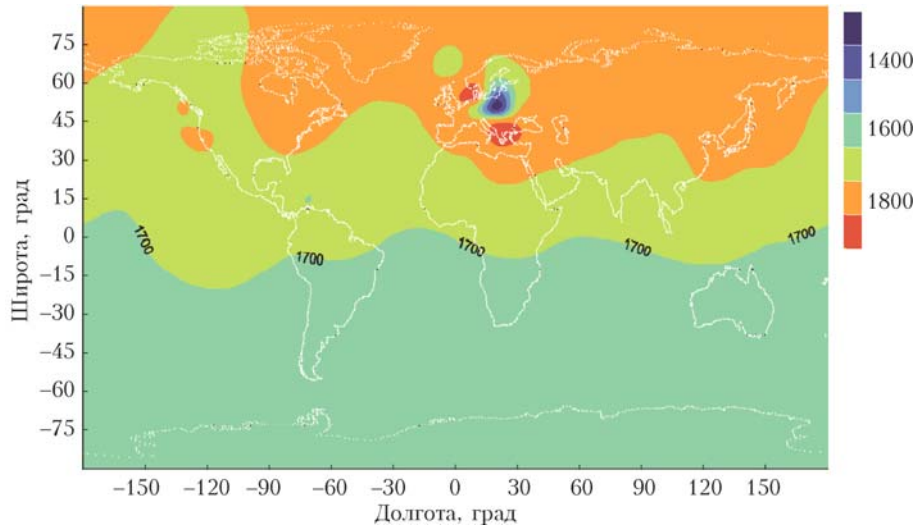


a

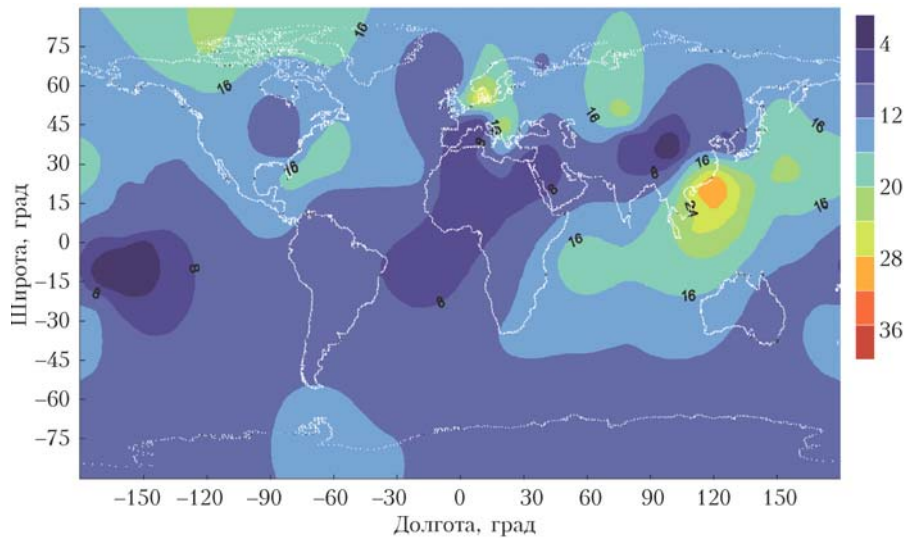


б

Рис. 4. Средние значения (*a*) и SKO сезонного хода (*б*) для углекислого газа



а



б

Рис. 5. Средние значения (а) и СКО сезонного хода (б) для метана

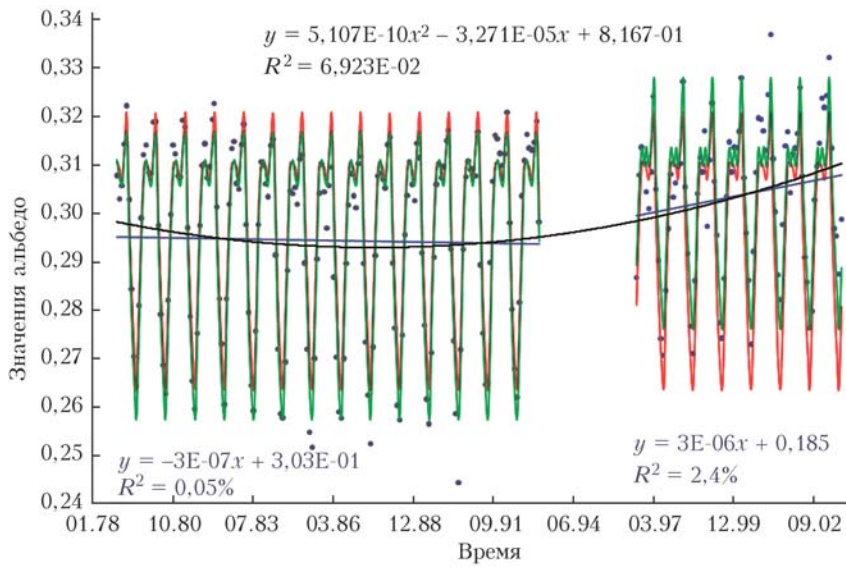


Рис. 7. Глобальное альбедо по данным измерений с КА «Nimbus-7» (1978–1993) и «Earth Probe» (1996–2003): точки – экспериментальные данные; зеленая линия – сезонный ход, вычисленный отдельно для каждого КА; красная линия – сезонный ход по совмещенным данным с обоих КА; синие линии – тренды, вычисленные отдельно для каждого КА (для КА «Nimbus-7» тренд статистически не значим); черная линия – тренд по совмещенным данным с обоих КА