

УДК 551.590.21

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ НА КЛИМАТ ЗЕМЛИ

В. И. Ермаков¹, В. П. Охлопков², Ю. И. Стожков

Показано, что на климат Земли влияет космическая пыль, поступающая в атмосферу из зодиакального пылевого облака, через которое движется Земля при вращении вокруг Солнца. Частицы аэрозоля являются зародышами облачных капель, которые эффективно отражают обратно в космос приходящую от Солнца радиацию, и тем самым влияют на климат Земли. Происходившие в прошлом изменения климата можно объяснить вариациями космической пыли в зодиакальном облаке. На основе спектрального анализа глобальных данных о температуре в приземном слое атмосферы за период 1880 – 2005 гг. дан прогноз о похолодании климата Земли в первой половине 21 века.

В последнее время широко обсуждается произошедшее в 20 веке потепление климата Земли на $0.6 - 0.8$ °С.

Существует две точки зрения объяснения этого явления. Согласно одной из них, потепление произошло в связи с усилением антропогенного влияния на климат Земли, согласно другой – по естественным причинам.

Наличие двух различных точек зрения свидетельствует о том, что главные причины происходивших изменений климата Земли до сих пор окончательно не выяснены.

Настоящая работа посвящена анализу возможных причин изменения климата с целью дать научно-обоснованный прогноз его изменений в ближайшем будущем.

¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный, Московской области.

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва.

Изменения климата Земли в недалеком и далеком прошлом. Прогноз изменения климата Земли в будущем нельзя сделать без анализа данных о его вариациях, происходивших как в недалеком, так и в далеком прошлом.

О том, как изменялся климат в последние 126 лет (период 1880 – 2005 гг.) имеются данные прямых наблюдений за температурой воздуха у поверхности Земли, которые получены на глобальной сети метеорологических станций. Среднемесячные значения этой температуры T_n за период 1880 – 2005 гг. опубликованы в ИНТЕРНЕТЕ на сайте ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/global_meanT_C.all. Среднегодовые значения T_n представлены на рис. 1.

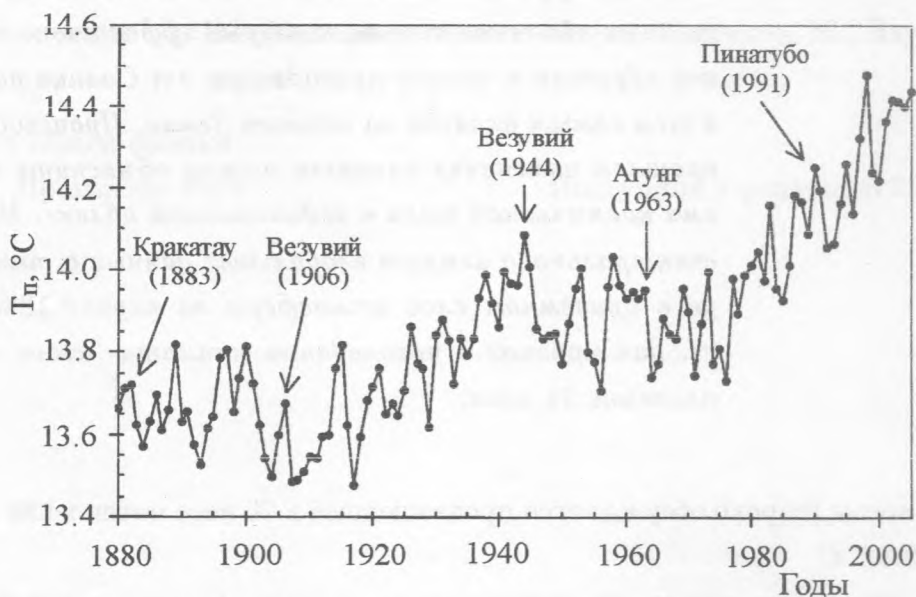


Рис. 1. Среднегодовые значения глобальной температуры воздуха T_n у поверхности Земли за период 1880 – 2005 гг. Стрелками показаны даты извержений вулканов.

Из рис. 1 видно, что за указанный период произошло потепление климата на $0.6 - 0.8$ °C. При этом в интервалы времени 1880 – 1910 гг. и 1945 – 1975 гг. наблюдались небольшие похолодания, а в интервалы 1910 – 1945 гг. и 1975 – 1998 гг. – максимальные потепления. Произшедшее изменение климата трудно объяснить антропогенным влиянием потому, что в течение всего рассматриваемого периода антропогенная деятельность непрерывно возрастала.

В [1] показано, как изменялась температура воздуха δT на ст. Восток (Антарктида) в последние 420 тыс. лет. Эти данные получены в результате изотопного анализа ледовых кернов из скважины, пробуренной на этой станции на глубину 3300 м.

В указанный интервал времени несколько раз периоды потепления сменялись периодами похолодания и наоборот. При этом изменения температуры достигали шести и более градусов. Эти изменения климата обычно связывают с длиннопериодными (вековыми) вариациями элементов орбиты Земли, известными как периоды Миланковича. Вековые вариации вызваны возмущениями, которые оказывают на земную орбиту 8 других планет Солнечной системы.

В работе [2] показано, как изменялась температура воздуха в последние 520 млн. лет. Для ее определения были использованы палеоклиматические данные. За указанный интервал времени Солнечная система четыре раза прошла через рукава Галактики. При этом произошли четыре смены климата от похолодания к потеплению и наоборот. При сменах климата изменения температуры достигали 5°C и более. Причиной происходивших изменений климата считают влияние материи галактических рукавов на Солнечную систему [3].

Климатическая система Земли и ее эффективная температура. Для того чтобы понять, под действием каких причин могли или могут происходить изменения климата, рассмотрим уравнение энергетического (теплового) баланса климатической системы Земли.

Глобальная климатическая система включает в себя три внешние оболочки Земли – атмосферу, Мировой океан и литосферу. Ее нагрев происходит под действием приходящей от Солнца коротковолновой радиации с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.5 \text{ мкм}$ и поступающего из недр Земли теплового потока. Нагретая система испускает в космос длинноволновое излучение с максимумом на длине волны $\lambda \approx 10 \text{ мкм}$. При этом система находится в тепловом равновесии с космосом.

Уравнение энергетического баланса климатической системы Земли записывается в виде [4]

$$\pi r^2 \cdot S \cdot (1 - A) + W_3 = 4\pi r^2 \cdot \sigma \cdot T_e^4, \quad (1)$$

где r – радиус Земли; S – солнечная постоянная, рассчитанная на удалении от Солнца в одну астрономическую единицу; A – сферическое альbedo Земли; W_3 – мощность теплового потока, поступающего в климатическую систему из недр Земли; σ – постоянная Стефана–Больцмана; T_e – эффективная (излучательная) температура климати-

ческой системы. Левая часть уравнения (1) представляет собой энергетический поток, нагревающий климатическую систему, а правая часть – уходящий из системы в космос тепловой поток.

Средняя мощность потока тепла W_3 , поступающего из недр Земли в климатическую систему, порядка 10^{13} Вт [5]. Эта величина примерно на четыре порядка меньше потока энергии, поступающего от Солнца. Поэтому величиной W_3 в уравнении (1) можно пренебречь. Тогда уравнение (1) запишется в виде:

$$S \cdot (1 - A)/4 = \sigma \cdot T_e^4. \quad (2)$$

Проводимые с 1978 года наблюдения со спутников показывают, что солнечная постоянная $S = 1366 \text{ Вт/м}^2$ и с течением времени изменяется незначительно (менее 0.1%) [6] (такому изменению S соответствует изменение $T_e \approx 0.05^\circ \text{C}$). Поэтому можно положить, что $S = \text{const}$. Сферическое альbedo A является переменной величиной. Современное его значение принимают равным 0.31 [4]. При указанных значениях S и A эффективная температура $T_e = 254 \text{ К}$ или -19°C . Эта температура характеризует полное количество электромагнитной энергии, излучаемое климатической системой в космос в единицу времени. Ей соответствует мощность потерь тепла Землей за счет инфракрасного излучения в космос, равная 236 Вт/м^2 . Ее величина хорошо согласуется с результатами спутниковых наблюдений [4].

Эффективная температура $T_e = -19^\circ \text{C}$ соответствует температуре атмосферы Земли на высоте $\approx 5.5 \text{ км}$, на которой масса атмосферы разделена на две примерно равные половины. Этот факт указывает на то, что главным излучателем климатической системы в инфракрасном диапазоне является атмосфера.

Глобальная температура воздуха у поверхности Земли – главный климатический параметр. Главным физическим параметром, характеризующим климат Земли, является глобальная температура воздуха у ее поверхности T_n . С нею связаны испарение влаги с поверхности Земли, облачность и осадки, динамика атмосферы, площадь ледового покрова и др.

Температуру T_n можно связать с температурой T_e , используя при этом простую двухслойную модель глобального радиационного баланса. В этой модели один слой климатической системы сосредоточен в тропосфере на высоте $\approx 5.5 \text{ км}$, а другой – у поверхности Земли. Тепло передается от более нагретого слоя, находящегося у поверхности Земли и имеющего температуру T_n , к менее нагретому слою, находящемуся на высоте

≈ 5.5 км и имеющему температуру T_e . В соответствии с законом Стефана–Больцмана для такой двухслойной системы уравнение энергетического баланса записывается в виде

$$S \cdot (1 - A - k)/4 = \sigma \cdot (T_n^4 - T_e^4) \text{ или } S \cdot (1 - A - k)/4 = \sigma T_n^4 \cdot (1 - T_e^4/T_n^4). \quad (3)$$

Здесь безразмерный коэффициент k характеризует среднюю поглощательную способность атмосферы по отношению к солнечному излучению. Он не является постоянным, а современное его значение примерно равно 0.26 [4].

Температуры T_e и T_n изменяются синфазно друг с другом. Поэтому входящий в соотношение (3) безразмерный параметр $(T_e/T_n)^4$ скорее характеризует само строение климатической системы, чем те потоки энергии, которые циркулируют в системе. Поэтому можно положить, что с течением времени он мало изменяется. В этом случае при $S = \text{const}$ температура T_n и климат Земли зависят от двух переменных величин – глобального альbedo A и средней поглощательной способности атмосферы k .

Ядра Айткена. Примерно одну третью часть солнечной энергии климатическая система Земли отражает обратно в космос. В отражении участвуют все составляющие климатической системы. Это сухой воздух, аэрозоль (в том числе облачный), а также вещества поверхностного слоя Земли, в первую очередь, снег и лед. Отражение происходит в результате рассеяния солнечного света этим веществом. Как показано в [3], в целом отражается обратно в космос 31% энергии, из них 8% отражает безоблачная атмосфера, 17% – облачная атмосфера и 6% – непосредственно земная поверхность.

С течением времени альbedo A изменяется. Наиболее заметно изменяются альbedo облачности и непосредственно земной поверхности. При этом главное влияние на климат Земли оказывают вариации альbedo облачного покрова, с которыми прямо связаны вариации альbedo земной поверхности. Так с увеличением облачного покрова понижается температура приземного воздуха, что приводит к увеличению снежного (ледового) покрова и соответственно альbedo поверхностного слоя Земли, и наоборот.

Наиболее эффективно солнечный свет рассеивают частицы атмосферного аэрозоля с радиусом $r > 0.1$ мкм. В основном это капельки воды и кристаллы льда, из которых состоят различные облака и туманы. В атмосфере присутствует также большое количество микродисперсного аэрозоля (так называемых ядер Айткена) с радиусами $r < 0.1$ мкм. Сами эти частицы невидимы, т.к. они незначительно рассеивают видимый солнечный свет. Однако они являются центрами конденсации водяного пара, на которых образуются облачные капли, хорошо рассеивающие солнечный свет. По этой

причине ядра Айткена играют определяющую роль в формировании облаков и поэтому существенно влияют на климат Земли.

Ядер Айткена во всей атмосфере Земли достаточно много. Наблюдения показывают, что и у поверхности Земли, и на высотах 80 – 100 км их концентрации составляют около 10^4 см^{-3} . Над океанами из-за вымывания осадками их концентрация примерно на порядок меньше. Распределение частиц по размерам имеет максимум при $r \approx 0.03 \text{ мкм}$, где r – радиус частицы.

Основным источником ядер Айткена в атмосфере Земли является космическая пыль. По имеющимся оценкам количество космической пыли, поступающей в атмосферу, лежит в пределах 0.25 – 14 млн. т/год [7]. Эта пыль вымывается из атмосферы с осадками. Количество осадков, выпадающих на поверхность Земли за год, равно $\approx 5 \cdot 10^{14} \text{ т/год}$. Средний радиус капель тех облаков, из которых идут осадки, равен $r_0 = 10 \text{ мкм}$, а средний радиус частиц Айткена (космической пыли), на которых растут капли, $r_a \approx 0.03 \text{ мкм}$. Масса капли облака больше массы частицы Айткена в $(4/3)\pi r_0^3 \cdot \rho_0 / [(4/3)\pi r_a^3 \cdot \rho_a] \approx 1.5 \cdot 10^8$, где $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ – плотность воды, а $\rho_a = 0.25 \text{ г/см}^3$ – плотность космической пыли [8]. Поэтому масса космической пыли, вымываемой из атмосферы с осадками, равна $\approx 3 \cdot 10^6 \text{ т/год}$, т.е. соответствует массе пыли, поступающей из космоса.

Менее значимым источником ядер Айткена являются вулканы взрывного типа, которые выбрасывают в стратосферу много пепла. Воздушными течениями в стратосфере этот пепел разносится на большие расстояния от места нахождения вулкана. В процессе “падения” из стратосферы на поверхность Земли частицы пепла выполняют роль ядер конденсации водяного пара, на которых растут облачные капли. Эти капли рассеивают солнечный свет обратно в космос и тем самым способствуют похолоданию климата Земли. Анализ среднемесячных данных T_n за период 1880 – 2005 гг. показал, что после мощных извержений вулканов Кракатау (1883 г.), Везувия (1906 и 1944 г.), Пинатубо (1991 г.) понижения глобальной температуры достигали значений $\sim 0.2^\circ \text{C}$ в интервале времени 1-3 года с момента извержения.

Зодиакальное пылевое облако – источник поступающей в атмосферу Земли космической пыли. Космическая пыль поступает в атмосферу из зодиакального пылевого облака при годовом вращении Земли вокруг Солнца. Основная часть пыли, обуславливающая зодиакальный свет, расположена между Солнцем и Главным поясом астероидов, находящимся между Марсом и Юпитером. Размеры частиц облака, обуславливающих зодиакальный свет, лежат в пределах от нескольких десятых долей микрона до

≈ 300 мк. Кроме этих частиц в облаке присутствует большое количество невидимых частиц с радиусами $r < 0.1$ мк. Через облако постоянно проходят планеты, кометы, астероиды и метеорные потоки.

Основным источником межпланетной пыли в зодиакальном облаке, являются короткопериодические кометы, которых в Солнечной системе насчитывается более $2.5 \cdot 10^6$ [8]. От 90 до 99% пылевого межпланетного вещества рождается при выбросах из ядер комет [9]. Пылевые хвосты у комет появляются на расстояниях от Солнца $r \approx 1.7$ а.е. Они возникают в процессе сублимации пылеледяного вещества ядер комет при движении к перигелию орбиты. Установлено, что кометы быстро разрушаются и исчезают, а после разрушения на их орбитах неоднократно наблюдаются метеорные потоки. Семейство короткопериодических комет Солнечной системы непрерывно пополняется в результате трансформации долгопериодических комет в короткопериодические. Эта трансформация происходит под воздействием больших планет. Источником долгопериодических комет является сферически симметричное облако Оорта. Оно расположено на расстоянии $\sim 2 \cdot (10^4 - 10^5)$ а.е. от Солнца и содержит $\approx 10^{12}$ комет [10].

Среди короткопериодических комет выделяются отдельные группы. Различают группы комет: Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна [10]. Отличительной особенностью отдельной группы является то, что афелии всех входящих в нее комет удалены от Солнца примерно на то же расстояние, как и орбита планеты, к которой эта группа принадлежит.

По той причине, что в семействе короткопериодических комет существуют отдельные группы, амплитудно-временной спектр концентрации пыли в зодиакальном облаке должен быть не сплошным, а линейчатым. В нем должны проявляться периоды вращений как групп комет, так и тех планет, к которым эти группы принадлежат, а также периоды их биений. Эти же периоды должны проявляться и во временных вариациях температуры приземного слоя воздуха T_n , которая, как было выше показано, зависит от концентрации пыли в зодиакальном облаке. При этом в вариациях T_n могут проявляться как периоды вращений, так и периоды биений.

Спектральный анализ температуры T_n за период 1880 – 2005 гг. Для спектрального анализа нами были использованы среднегодовые значения температуры приземного слоя воздуха T_n , полученные на глобальной сети метеорологических станций за период 1880–2005 гг., продолжительностью 126 лет (о них шла речь выше). В процессе анализа были найдены линии, превосходящие по амплитуде 99% уровень значимости, определены периоды и фазы этих линий.

Оказалось, что спектр температурных данных является не сплошным, а линейчатым. В нем присутствует 16 линий с 99% уровнем значимости. Наиболее выражены в спектре линии с периодами 194, 64, 32, 21 год. Из них первые две линии по своей амплитуде являются определяющими. Найденные спектральные линии были идентифицированы со следующими периодами вращения планет и их пар.

Линия с периодом 194 г. идентифицирована с парой Нептун – Плутон (198 лет), линия 64 г. – с парой Уран – Плутон (63 года), линия 32 г. – с полупериодом пары Уран – Плутон, и линия 21 год – с парой Юпитер – Уран (20.8 года). Найденные линии идентифицированы не с отдельными планетами, а с парами планет. Это указывает, что концентрация пыли в зодиакальном облаке определяется суммой вкладов отдельных планет.

Прогноз похолодания климата Земли в ближайшие полвека. В интервале времени в 126 лет (1880 – 2005 гг.) в вариациях T_n присутствовали определенные периодичности, амплитуды, периоды и фазы которых известны. Эти данные могут быть использованы для прогноза изменения климата в ближайшем будущем. Для этой цели мы использовали сумму вышеуказанных периодичностей с периодами в 194, 64, 32, 21 год, имеющими максимальные амплитуды.

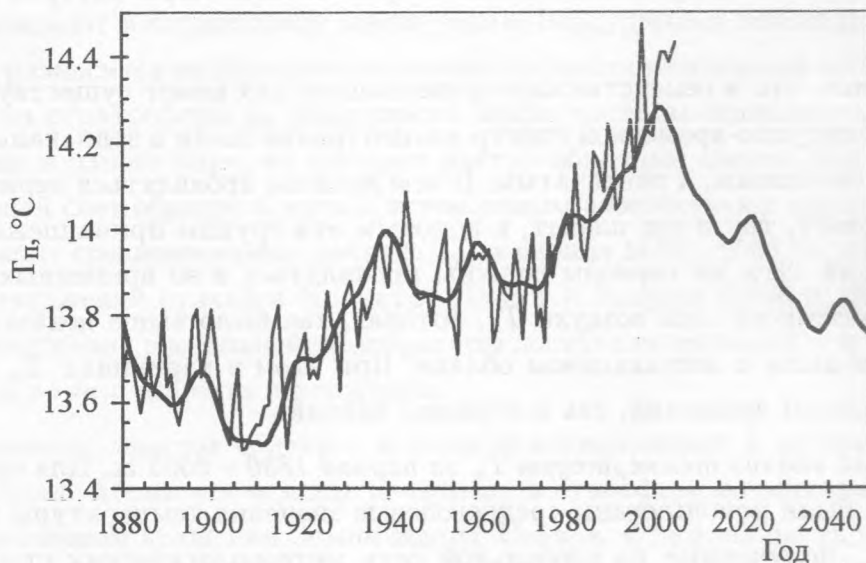


Рис. 2. Временной ход средней глобальной температуры у поверхности Земли (тонкая линия) и ее расчетные значения (толстая линия) до 2050 г.

АМПЛИТУДА	ПЕРИОД	ФАЗА
0.2765	192.7342	124.0497
0.1568	64.3267	25.2712
0.0698	32.5371	19.0012
0.0724	20.8962	7.8688
0.0335	10.3881	4.0237

Суммарная кривая, построенная с учетом амплитуд, периодов и фаз указанных четырех периодичностей, представлена на рис. 2. Из рисунка видно, что в ближайшие полвека будет происходить похолодание климата Земли. Оно составит $\sim 0.5^\circ\text{C}$. При этом в 20-е и 40-е годы будут наблюдаться периоды небольших потеплений, во время которых могут иметь место засухи. Примерно 22-летний цикл наблюдается в засухах с 1700 года.

Для прогноза изменений климата в ближайшее время желательно использовать как можно более длинный ряд наблюдений за его вариациями в прошлом. К сожалению, данных прямых наблюдений за изменениями климата нет. В то же время имеются данные, которые косвенно характеризуют изменения климата, происходившие в более далеком прошлом. К ним относятся данные о вариациях содержания космогенного изотопа Be-10 в ледовых кернах Гренландии и Антарктиды, полученные за длительный период времени. Мы использовали данные за последние 500 лет (Гренландия) и ~ 1000 лет (Антарктида), соответственно.

Эти данные содержат в себе информацию как о потоке космических лучей, которые порождают в атмосфере Be-10 , а также об осадках, с которыми вымываются из атмосферы эти изотопы. В связи с тем, что поток космических лучей с течением времени изменяется незначительно, данные о содержании Be-10 во льдах несут информацию, в основном, об осадках. Хорошо известно, что количество осадков равно количеству испаренного с поверхности Земли водяного пара, а испарение зависит от температуры воды. Таким образом, данные о концентрации Be-10 в ледовых кернах несут, главным образом, информацию об осадках и, соответственно, о температуре Земли.

Проведенный нами анализ данных Be-10 , полученных в Гренландии и в Антарктиде показал наличие в них тех же периодов ≈ 194 , 64, 32 и 22 года. В связи с этим сделанный прогноз о похолодании климата Земли в первой половине 21 века получает дополнительное обоснование.

Почему происходили изменения климата в далеком прошлом? Ранее было показано, что главным источником пыли в зодиакальном облаке являются кометы. С течением времени количество короткопериодных комет, присутствующих в Солнечной системе, изменяется.

При движении вокруг центра Галактики Солнечная система и, соответственно, Земля проходят через рукава Галактики, где присутствуют гигантские молекулярные облака. Приливное влияние этих облаков вызывает приток комет из облака Оорта в планетную область Солнечной системы [3]. Это, в свою очередь, приводит к увеличению концентрации пыли в зодиакальном облаке и, соответственно, к похолоданию на Земле. Так можно объяснить происходившие изменения климата Земли в последние 520 млн. лет. Вариации температуры Земли за это время представлены в работе [2].

Астрономические наблюдения точно показывают, что вся совокупность планет Солнечной системы влияет на орбитальное движение Земли вокруг Солнца. При этом наблюдаются долгопериодные вариации элементов орбиты Земли, исчисляемые десятками и сотнями тысяч лет (периоды Миланковича). Нет сомнения, что вся совокупность планет влияет с теми же периодами на кометы и зодиакальное облако. Поэтому вариации температуры, наблюдаемые в ледовых ядрах Антарктиды в последние 420 тыс. лет, можно связать с кометами и концентрацией пыли в зодиакальном облаке.

Таким образом, те изменения климата Земли, которые происходили как в недавнем, так и в далеком прошлом, можно объяснить изменениями альбедо климатической системы Земли, которые происходили под влиянием зодиакального пылевого облака. Как следует из уравнений (1) и (2), происходившие изменения температуры Земли на $5 - 6^\circ \text{C}$ могут быть вызваны изменением величины альбедо климатической системы Земли A на $\sim 6\%$.

Заключение. Показано, что основной причиной происходивших изменений климата, как в близком, так и в далеком прошлом было изменение альбедо климатической системы Земли, которое вызвано вариациями концентрации пыли в зодиакальном пылевом облаке. Произошедшее в период 1880 – 2005 гг. потепление климата Земли нельзя объяснить ни антропогенным влиянием, ни изменением активности Солнца, ни извержениями вулканов.

На основании спектрального анализа температурных данных за последние 126 лет дан прогноз о похолодании климата в первой половине 21 века.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Petit J. R., Jouzel J., Raoued D. et al. Nature, **399**, 429 (1999).
- [2] Veizer J., Godderis Y., Francois L. M. Nature, **408**, 698 (2000).
- [3] Мазеева О. А. *Астрономический вестник*, **38**, N 4, 372 (2004).
- [4] Liou Ku-Nah. An introduction to atmospheric radiation. Academic Press, New York – London, 1980, 380 p. (имеется перевод на русский язык. Лиоу Ку-Нан. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л., Гидрометеиздат, 1984).
- [5] Жданов В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М., Наука, 1983.
- [6] Jain K., Hansan S. S. Reconstruction of the past total solar irradiance on short timescales // *Journal of Geophysical Research*, vol. A03105, doi 10.1029/ 203 JA 010222, 2002.
- [7] Атмосфера. Справочник. Под ред. Ю.С. Седунова и др. Л., Гидрометеиздат, 1991.
- [8] Allen C. W. Astrophysical quantities. University of London. The Athlone Press, 1973, 445 p. (имеется перевод Аллен К.У. Астрофизические величины. М., Мир, 1977).
- [9] Горбанев Ю. М., Князькова Е. Ф. *Астрономический вестник*, **37**, N 6, 555 (2003).
- [10] Энеев Т. М., Ефимов Г. Б. *Земля и Вселенная*, N 1, 80 (2005).

Поступила в редакцию 20 февраля 2006 г.