

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Ю.И. Стожков

COSMIC RAYS AND ATMOSPHERIC PROCESSES. CAUSES FOR CLIMATE CHANGES

Yu.I. Stozhkov

Космические лучи (КЛ) являются основным ионизатором атмосферы и отвечают практически за все электрические явления, наблюдаемые в ней. КЛ обеспечивают непрерывную работу глобальной электрической цепи, являются главным компонентом при образовании грозовой облачности и возникновении молниевых разрядов. Изменяющиеся со временем потоки КЛ через процесс образования облачности и космическая пыль, попадающая в атмосферу из космического пространства, влияют на величину альбедо Земли. Изменения величины альбедо определяют климат Земли. Анализ данных глобальной температуры приземного слоя воздуха и данных, содержащих информацию об изменениях климата в прошлом (например, таких как концентрации Be-10 в гренландском и антарктическом льдах), показывает, что в ближайшие десятилетия на Земле будет происходить глобальное похолодание.

Cosmic rays (CRs) are the main source of ionization in the atmosphere and practically they are responsible for all electrical phenomena observed in it. CR particles provide permanent functioning of a global electric circuit, they are the main component of thundercloud formation and provide lightning occurrence. CR fluxes varying with time, through the process of cloud formation and cosmic dust, entering the atmosphere from space, influence the Earth's albedo. Changes of the Earth's albedo initiate climate changes. The analysis of data on global surface air temperature and data carrying the information on climate changes in the past (e.g., concentrations of Be-10 atoms in Greenland and Antarctic ice cores) shows that in the nearest tens of years the process of global cooling of the Earth's climate will take place.

Введение

Международная Байкальская молодежная научная школа 2007 г. по современным проблемам астрофизики и физики космической плазмы проходит в знаменательный год. Прошло 50 лет с момента запуска Советским Союзом первого в мире искусственного спутника Земли. 4 октября 1957 г. началась эра изучения и освоения космического пространства. В 2007 г. начинают действовать две крупные научные программы. Программа «Международный полярный год 2007–2008» (МПП) приурочена к 125-летию первого МПП (1882–1883 гг.), 75-летию второго МПП (1932–1933 гг.) и к 50-летию программы Международного геофизического года (1957–1958 гг.). Программа Международного гелиофизического года (МГГ, 2007 г.) включает в себя солнечно-земную физику, исследования планет, гелиосферы и ее взаимодействие с межзвездной средой. Эти две программы направлены на получение новых данных через междисциплинарные исследования физических процессов, на стимулирование международного научного сотрудничества.

В настоящей лекции невозможно осветить все направления работ, которые выполняются в рамках перечисленных программ. Мы рассмотрим вопросы, относящиеся к роли КЛ в атмосферных процессах, изменениям климата Земли в прошлом и к тому, какой климат ожидает нас в ближайшие десятилетия.

Что такое КЛ?

КЛ представляют поток заряженных частиц (~85 % составляют протоны, ~10 % – ядра гелия, ~5 % – более тяжелые ядра, также имеется небольшая доля электронов), приходящих к нам из космического пространства. КЛ были открыты В. Гессом в 1912 г. Энергетический спектр КЛ простирается на ~14 порядков по величине энергий частиц

от $\sim 10^6$ эВ до $\sim 10^{20}$ эВ ($1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-12}$ эрг). В зависимости от вида источника/источников КЛ подразделяются на галактические, солнечные, аномальные КЛ, частицы, ускоренные в магнитных полях других планет (например, в магнитосфере Юпитера).

Основными источниками КЛ в нашей Галактике являются взрывы сверхновых, на ударных волнах которых происходит ускорение КЛ вплоть до энергий $\sim 10^{16}$ эВ [1]. Во взрывных процессах на Солнце также происходит генерация солнечных КЛ. В мощных солнечных вспышках экспериментально наблюдались солнечные частицы с энергиями до $\sim 10^{11}$ эВ. Солнце принадлежит к карликовым звездам. Карликовые звезды составляют основное звездное население Галактики (число карликовых звезд в Галактике равно $\sim 10^{11}$). Большинство карликовых звезд являются всыщечноактивными [2]. На них происходят более мощные звездные вспышки, чем на Солнце. Если на Солнце энергия наиболее мощных вспышек составляет величину $\sim 10^{32}$ эрг, то на карликовых звездах мощность вспышек может достигать $\sim 10^{36}$ эрг. Частота звездных вспышек также значительно выше частоты солнечных вспышек. В этих процессах происходит ускорение заряженных частиц. Поэтому активные карликовые звезды также являются источниками КЛ. Они могут ускорять частицы до энергий $\sim 10^{15}$ эВ и обеспечивать необходимую плотность энергии КЛ ($\sim 0.5 \text{ эВ/см}^3$), наблюдаемую в нашей Галактике [3]. Таким образом, источниками КЛ в Галактике являются взрывы сверхновых и вспышки на карликовых звездах.

КЛ в атмосфере Земли

КЛ из межзвездной среды попадают в гелиомагнитосферу, где испытывают воздействие солнечного магнитного поля, выносимого в межзвездную среду солнечным ветром [4]. Поскольку солнечная актив-

ность имеет ~11-летний цикл, поток КЛ имеет такую же периодичность. На орбите Земли даже в минимумах солнечной активности модуляция КЛ существенна, и на границе атмосферы поток частиц КЛ меньше, чем в межзвездной среде. На рис. 1 приведен временной ход потока частиц КЛ, падающих на границу атмосферы с 1957 г. по настоящее время [5, 6]. Наиболее крупномасштабными вариациями этого потока являются вариации, вызываемые 11-летним циклом солнечной активности.

Космические частицы, падающие на границу атмосферы, размножаются в ней, если их энергия достаточно велика, или, если их энергия мала, поглощаются из-за потерь энергии на ионизацию. В результате этих процессов в атмосфере формируется так называемая кривая поглощения или высотная кривая потока КЛ, форма которой определяется энергетическим спектром частиц КЛ и величиной их потока на границе атмосферы. Поток КЛ на границе атмосферы и, следовательно, высотная кривая в ней зависят от уровня солнечной активности и величины магнитного поля Земли в точке наблюдения. Земное магнитное поле определяет минимальную жесткость (энергию) частиц КЛ, начиная с которой

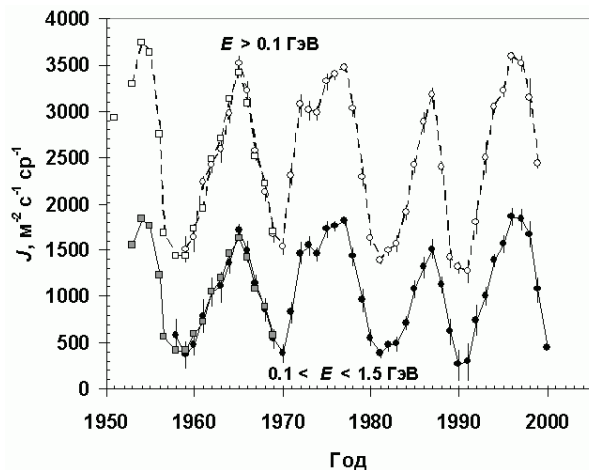


Рис. 1. Временной ход потока КЛ, падающего на границу атмосферы в полярных широтах (среднегодовые значения). Самый длинный ряд однородных данных по первичным потокам КЛ [5, 6].

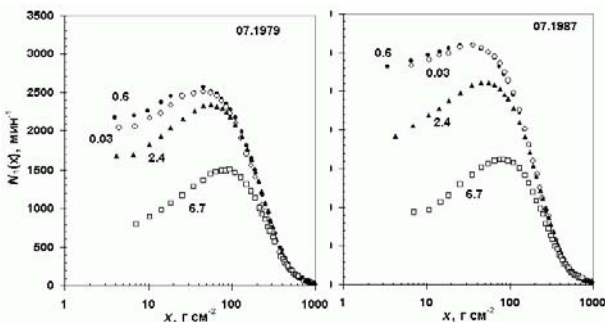


Рис. 2. Среднемесячные значения потока КЛ N_1 в зависимости от величины атмосферного давления x в период максимума и минимума солнечной активности (левая и правая панели соответственно). Данные получены в северных полярных широтах (темные точки, величина геомагнитного порога обрезания $R_c=0.6$ ГВ), в Антарктиде (светлые кружки, $R_c=0.03$ ГВ), на средних широтах (темные треугольники, $R_c=2.4$ ГВ) и на низких широтах (светлые квадраты, $R_c=6.7$ ГВ).

частицы могут попасть в атмосферу Земли [7]. Пример высотных зависимостей потока КЛ в атмосфере на разных широтах приведен на рис. 2 для периодов минимума и максимума солнечной активности соответственно. У поверхности Земли поток КЛ много меньше, чем в более высоких слоях атмосферы или на ее границе, так как основная доля энергии потока КЛ, падающего на границу атмосферы, и основная доля частиц поглощаются в атмосфере Земли.

КЛ и электрические явления в атмосфере

Поток энергии КЛ, падающий на границу атмосферы ($\sim 10^{-5}$ Вт/м²), по величине на ~8 порядков меньше энергии солнечной радиации ($\sim 1.36 \cdot 10^3$ Вт/м²). Почти вся энергия КЛ поглощается в атмосфере и идет на возбуждение и ионизацию атмосферных молекул и атомов, обеспечивая электропроводность атмосферы. КЛ являются основным источником ионизации атмосферы. В атмосфере существуют и другие источники ионизации, но они или действуют в ограниченной области высот или широт, или существуют короткое время.

Вблизи земной поверхности всегда существует электрическое поле ϵ , величина которого в условиях хорошей погоды $\epsilon \approx 120$ В/м (такое поле соответствует электрическому заряду Земли $q \approx -6 \cdot 10^5$ Кл). В атмосфере всегда течет электрический разрядный ток $J \approx 10^{-12}$ А/м². Этот ток за короткое время разрядил бы Землю. Но этого не происходит, так как в земной атмосфере работает так называемая глобальная электрическая цепь, которая изображена на рис. 3 [8]. Генераторами тока, подзаряжающего Землю отрицательным электричеством, являются грозовые облака. Отрицательный электрический заряд передается на земную поверхность молниевыми разрядами облако–Земля и осадками из этих облаков.

КЛ создают ионы и обеспечивают электропроводность атмосферы на высотах 3–35 км. Потоки КЛ изменяются в противофазе с 11-летним циклом солнечной активности, поэтому можно ожидать, что величина атмосферного тока J будет иметь 11-летний ход. Эксперимент действительно показывает такую связь (см. рис. 4). С ростом потока КЛ в атмосфере N

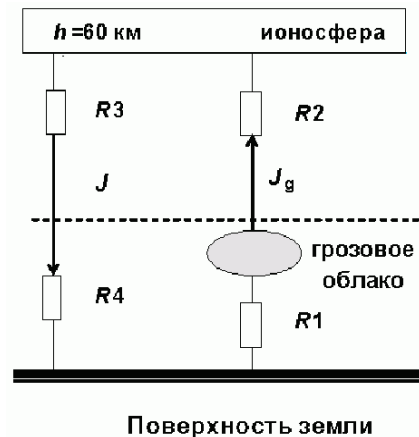


Рис. 3. Схематическое изображение глобальной электрической схемы, действующей в атмосфере Земли: R_1, R_4, R_2, R_3 – омические сопротивления тропосферы и стратосферы, J и J_g – электрический ток разряда в атмосфере и ток заряда от грозовых облаков соответственно.

увеличивается ее проводимость и возрастает величина J [9]. Имеется хорошая корреляция между этими величинами, коэффициент корреляции $r(N, J) = 0.64 \pm 0.15$.

В атмосфере существуют грозовые облака и молниевые разряды. В этих явлениях существенную роль играют потоки КЛ. В процессе образования грозового облака ионы, образуемые в нижней тропосфере КЛ и естественной радиоактивностью, прилипают к аэрозолям – центрам конденсации влаги, делая их положительно или отрицательно заряженными. Вместе с восходящими потоками воздуха эти заряженные и нейтральные аэрозоли начинают подниматься вверх. С увеличением высоты температура воздуха падает и водяной пар становится пересыщенным. Образование водных капель на аэрозолях возможно только в пересыщенном паре. На отрицательно заряженных аэрозолях процесс конденсации наступает при меньших значениях пересыщения паров воды, чем на положительно заряженных или нейтральных аэрозолях. Аэрозоли с прилипающими к ним молекулами воды поднимаются вместе с восходящими потоками воздуха до тех пор, пока их масса не станет достаточно большой и сила земной гравитации не уравнивает подъемную силу восходящих потоков воздуха. Для отрицательно заряженных водных капель процесс их роста и подъема завершится раньше, чем для положительно заряженных или нейтральных капель. Таким образом, происходит естественное разделение электрических зарядов в грозовом облаке: в нижней части облака собирается в основном отрицательный заряд, в верхней части – положительный [10].

После образования грозового облака необходимо создать условия для возникновения молниевых разрядов. По мере роста грозового облака напряженность электрического поля ϵ в нем растет и может достигать значений $\epsilon \approx 3$ кВ/см. Однако эта величина ϵ слишком мала, чтобы произошел пробой воздуха (для этого нужно иметь $\epsilon \approx (20-30)$ кВ/см). И снова на помощь приходят КЛ. Высокоэнергичная космическая частица с $E \geq 10^{15}$ эВ при взаимодействии с ядром воздуха образует огромное (более 10^6) число

вторичных частиц – так называемый широкий атмосферный ливень [7]. Все эти вторичные частицы образуются практически одновременно, являются генетически связанными между собой и производят огромное число ионизованных следов-треков в атмосфере. По этим ионизованным трекам и распространяется молниевый разряд [10]. Поток высокоэнергичных КЛ не зависит от солнечной активности, т. е. является постоянным во времени и полностью обеспечивает наблюдаемую в грозовом облаке частоту молниевых разрядов. Поскольку потоки КЛ являются необходимым компонентом всех процессов в атмосфере, в которых участвует электричество, можно полагать, что КЛ играют важную роль в процессах изменения климата Земли [см., например, 11].

Глобальное потепление климата

С 1880 г. на метеорологических станциях проводятся регулярные измерения температуры воздуха у поверхности Земли в разных точках земного шара, следовательно, мы имеем данные об изменении этой температуры почти за 130 лет. На рис. 5 приведен временной ход средней глобальной температуры в приземном слое воздуха T_p [12]. Видно, что за указанный период в целом произошло потепление климата на ~ 1 °С. При этом в 1880–1910 гг. и 1945–1975 гг. наблюдались небольшие похолодания, а в 1910–1945 гг. и 1975–1998 гг. наблюдались потепления. Рост значений T_p за последние ~ 100 лет показывает, что происходит глобальное потепление климата.

Глобальное потепление может быть вызвано естественными (природными) причинами, или воздействием человека на окружающую среду, или совокупным действием обоих факторов. Чтобы найти физический механизм и определить, какой фактор является основным, целесообразно рассмотреть вопрос: изменялся ли климат Земли в прошлом? Анализ ледовых кернов из скважины, пробуренной на ст. Восток в Антарктиде на глубину ~ 3300 м, показывает, что в последние 420 тыс. лет несколько раз периоды потепления сменялись периодами похолодания и наоборот. Изменения температуры достигали шести

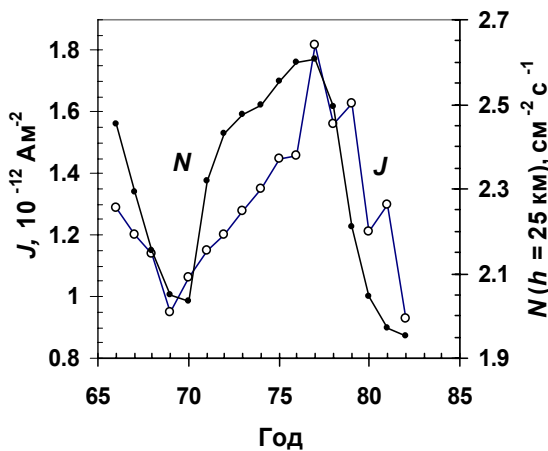


Рис. 4. Временные изменения среднегодовых значений потока КЛ N на средних широтах в атмосфере на высоте $h=25$ км и атмосферного тока J , измеренного на средних широтах на уровне Земли [10].

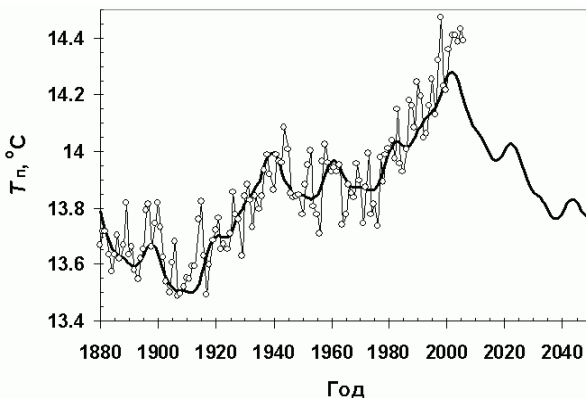


Рис. 5. Среднегодовые значения глобальной температуры приземного слоя воздуха T_p : открытые кружки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет [12, 19].

и более градусов [13]. Температура, а следовательно и климат на Земле, значительно изменялись и за более длительный интервал времени – за последние 520 млн. лет. Это было найдено по палеоклиматическим данным [14]. За это время Солнечная система четыре раза прошла через рукава Галактики и было отмечено четыре смены климата от похолодания к потеплению и наоборот (ΔT были более 5°C). Причиной происшедших изменений климата считают влияние материи галактических рукавов на Солнечную систему. Таким образом, экспериментальные данные показывают, что в далеком и близком прошлом имели место значительные изменения климата.

Климатическая система Земли. Уравнение теплового баланса

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 радиации с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.5$ мкм. Нагретая система испускает в космос длинноволновое излучение с максимумом на длине волны $\lambda \approx 10$ мкм. Система находится в тепловом равновесии с космосом. Уравнение энергетического баланса климатической системы Земли записывается в виде $S(1 - A) = \sigma T_e^4$, где S – солнечная постоянная на 1 астрономической единице, A – сферическое альbedo Земли, σ – постоянная Стефана–Больцмана, T_e – эффективная (излучательная) температура климатической системы [15]. Здесь мы пренебрегаем тепловым потоком, поступающим в климатическую систему из недр Земли, из-за его малости по сравнению с величиной S . Левая часть уравнения представляет собой энергетический поток, нагревающий климатическую систему, а правая часть – уходящий из системы в космос тепловой поток. Спутниковые эксперименты показывают, что величина S практически постоянна, $S=1366$ Вт/м² и с течением времени изменяется менее, чем на 0.1 % (такому изменению S соответствует изменение $T_e \approx 0.05^\circ\text{C}$). Величина альbedo A является переменной величиной. Современное его значение принимают равным 0.31 [15], тогда эффективная температура $T_e = 254$ К или -19°C . Эффективная температура $T_e = -19^\circ\text{C}$ соответствует температуре атмосферы на высоте ≈ 5.5 км, на которой масса атмосферы разделена на две примерно равные половины. Основным излучателем климатической системы в инфракрасном диапазоне является атмосфера.

Главным физическим параметром, характеризующим климат Земли, является глобальная температура воздуха у ее поверхности T_n . Она определяет скорость испарения влаги с поверхности Земли, облачность, осадки и др. Температуру T_n можно связать с температурой T_e , так как они изменяются синфазно. В этом случае при $S = \text{const}$ температура T_n и климат Земли зависят от величины глобального альbedo A .

Примерно одну треть часть солнечной энергии климатическая система Земли отражает обратно в космос. В отражении участвуют все составляющие климатической системы (сухой воздух, аэрозоль,

вещества поверхностного слоя Земли, такие как снег и лед). Отражение происходит в результате рассеяния солнечного света этим веществом. В целом отражается обратно в космос 31 % энергии. С течением времени величина A изменяется. Наиболее заметно изменяются альbedo облачности и непосредственно земной поверхности.

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 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, так как 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 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. Основным источником ядер Айткена в атмосфере Земли является космическая пыль. Количество космической пыли, поступающей в атмосферу, лежит в пределах $0.25\text{--}14 \cdot 10^6$ т/год [16]. Менее значимым источником ядер Айткена являются извержения вулканов, которые выбрасывают в стратосферу много пепла. Таким образом, поверхностная температура приземного слоя воздуха T_n зависит от величины альbedo Земли A , которая, в свою очередь, определяется количеством пыли в атмосфере.

Зодиакальное пылевое облако – источник космической пыли в атмосфере Земли

Космическая пыль поступает в атмосферу из зодиакального пылевого облака при годовом вращении Земли вокруг Солнца. Основная часть пыли расположена между Солнцем и Главным поясом астероидов, находящимся между Марсом и Юпитером. Основным источником межпланетной пыли в зодиакальном облаке являются короткопериодические кометы, которых в Солнечной системе насчитывается более $2.5 \cdot 10^6$ [17]. Семейство короткопериодических планет Солнечной системы непрерывно пополняется в результате трансформации долгопериодических комет в короткопериодические. Источником долгопериодических комет является облако Оорта. Оно расположено на расстоянии $\sim 2 \cdot (10^4\text{--}10^5)$ а. е. от Солнца и содержит $\sim 10^{12}$ комет [18].

Среди короткопериодических комет выделяются отдельные группы Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна [18]. Отличительной особенностью отдельной группы является то, что афелии всех входящих в нее комет удалены от Солнца примерно на то же расстояние, что и орбита планеты, к которой эта группа принадлежит.

Поскольку в семействе короткопериодических комет существуют отдельные группы, амплитудно-временной спектр концентрации пыли в зодиакальном облаке должен быть не сплошным, а линейча-

тым. 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 зависит от концентрации пыли в зодиакальном облаке. При этом в вариациях T_n могут проявляться как периоды вращений, так и периоды биений.

Изменения климата в ближайшем будущем

Спектральный анализ среднегодовых значений T_n , полученных на глобальной сети метеорологических станций за период 1880–2005 гг., показал наличие линий, превосходящих по амплитуде 99%-е уровни значимости. Наиболее выражены в спектре линии с периодами 192.7, 64.3, 32.5, и 20.9 года. Из них первые две линии по своей амплитуде являются определяющими.

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

Полученные данные были использованы для прогноза изменения климата в ближайшем будущем [19]. Была использована сумма вышеуказанных периодичностей, имеющих максимальные амплитуды. Суммарная кривая, построенная с учетом амплитуд, периодов и фаз указанных четырех периодичностей, представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что в ближайшие полвека будет происходить похолодание климата Земли. Оно составит $\sim (-0.5)^\circ\text{C}$.

Для прогноза изменений климата желательно использовать как можно более длинный ряд наблюдений за его вариациями в прошлом. Данные о вариациях содержания космогенного изотопа Be-10 в ледовых ядрах Гренландии и Антарктиды, полученные за длительный период времени (сотни и тыс. лет), содержат информацию о климате Земли в прошлом. Анализ этих данных показывает наличие в них тех же периодов $\sim 194, 64, 32$ и 22 года. В связи с этим прогноз о похолодании климата Земли в первой половине 21 века получает дополнительное обоснование.

Заключение

Потоки КЛ играют важную (во многих случаях определяющую) роль в атмосферных процессах, связанных с электрическими явлениями, а также в механизме изменений климата через процессы образования облачности и грозовой облачности.

Основной причиной происшедших 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 антропогенным влиянием.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей. М.: АН СССР, 1963. 384 с.
2. Гершберг Р.Е. Активность солнечного типа звезд Главной последовательности. Одесса: Астропринт, 2002. 688 с.
3. Копысов Ю.И., Стожков Ю.И. Корональное электричество активных карликовых звезд типа Солнца как универсальный ускоритель заряженных частиц в Галактике // Изв. РАН, сер. физ. 2007. Т. 71 (в печати).
4. Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965. 362 с.
5. Стожков Ю.И., Свирижевский Н.С., Базилевская Г.А. и др. Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1857–2007): Препринт № 14 / ФИАН, Москва, 2007.
6. Stozhkov Y.I., Okhlopov V.P., Svirzhevsky N.S. Cosmic ray fluxes in present and past times // Solar Phys. 2004. V. 224, N 1-2. P. 323–333.
7. Мурзин В.С. Введение в физику космических лучей. М.: МГУ, 1988. 286 с.
8. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
9. Stozhkov Yu.I. The role of cosmic rays in the atmospheric processes // J. Phys. G: Nucl. Particle Phys. 2003. V. 29, N. 5. P. 913–923.
10. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозových облаков: Препринт № 2 / ФИАН, Москва, 2004. 38 с.
11. Svensmark H., Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray flux and global coverage – a missing link in solar-climate relationship // J. Atm. Sol-Terr. Phys. 1977. V. 101. P. 1225–1232.
12. ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/anomalies/annual.ocean.90S.90N.df_1901-2000mean.dat
13. Petit J.R., Jouzel J., Raoued D., et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. 1999. V. 399. P. 429–436.
14. Veizer J., Godderis Y., Francois L.M. Evidence for decoupling of atmospheric CO_2 and global climate during the Phanerozoic eon // Nature. 2000. V. 408. P. 698–701.
15. Liou Ku-Nah. An introduction to atmospheric radiation. Academic Press, New York – London, 1980. 380 p. (на русском яз.: Лиоу Ку-Нан. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 376 с.).
16. Атмосфера. Справочник / Под ред. Ю.С.Седунова и др. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
17. Allen C.W. Astrophysical quantities. University of London. The Athlone Press, 1973, 445 p. (на русском яз.: Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977. 445 с.).
18. Энеев Т.М., Ефимов Г.Б. Миграция малых тел в Солнечной системе // Земля и Вселенная. 2005. № 1. С. 80–89.
19. Ермаков В.И., Охлопков В.П., Стожков Ю.И. Влияние космической пыли на климат Земли // Краткие сообщения по физике. Москва, ФИАН, 2006. № 3. С. 41–51.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва