

Глобальное потепление и его возможные причины

А.И. ХЛЫСТОВ,
кандидат физико-математических наук
ГАИШ МГУ

Р.К. КЛИГЕ,
доктор физико-математических наук
Географический факультет МГУ

В.С. СИМКИН

В статье рассматриваются наиболее вероятные эндогенные (внутренние) и экзогенные (внешние)

факторы, которые могут вызвать изменения климата Земли с периодами от нескольких до сотен тысяч лет.

Обсуждается вопрос о состоятельности гипотезы антропогенного глобального потепления.

ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

Несмотря на трудности в получении экспериментального материала, связанные как с ошибками измерений, так и с недостаточной плотностью сети метеостанций, большинство экспертов считают установленным фактом глобальный рост поверхностной температуры Земли с 1860 г. по 2015 г. примерно на 0,8 °С. Реконструкции хода средней температуры Земли за последнюю тысячу лет по ширине колец деревьев и некоторым другим источникам показали,

что в последние 150 лет рост температуры заметно усилился. Особенно быстрый подъем температуры наблюдается с 1985 г. Многие климатологи считают, что такое беспрецедентное за последние 440 тыс. лет глобальное потепление с высокой вероятностью связано с антропогенным ростом концентрации углекислого газа в атмосфере Земли, усилившим парниковый эффект. Это мнение базируется на построенных в последние десятилетия моделях взаимодействия атмосферы, океана и суши. В них

учитывались не только естественные факторы, но и дополнительное влияние углекислого газа на рост температуры. Утверждается, что только в “дополнительных” моделях результаты расчетов соответствуют наблюдениям.

Имеющиеся в настоящее время разнообразные модели, учитывающие антропогенный парниковый эффект, показывают, что если не будут приняты кардинальные меры по ограничению техногенных эмиссий диоксида углерода (CO₂) на Земле, то к 2050–2070 гг. его

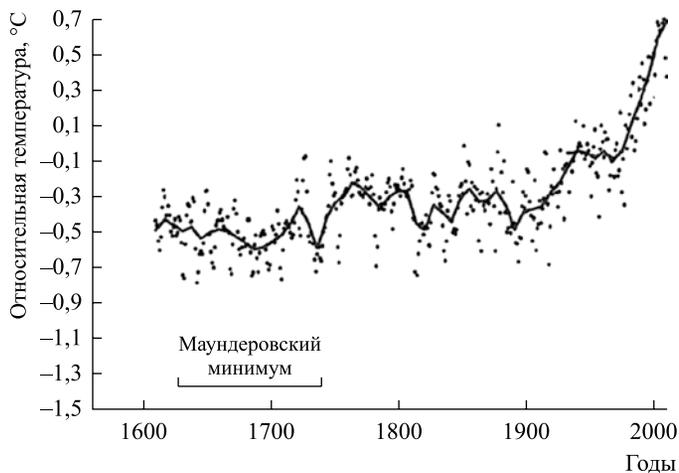


График изменения температуры на Земле с 1600 по 2010 гг. Указаны наблюдаемые (точки) и сглаженные средние значения приземной температуры (<http://dx.doi.org/10.4236/ns.2013.510136>).

В.М. Котлякова в № 4, 2017 журнала). Оказалось, что на протяжении 440 тыс. лет колебания температуры – от ледниковых эпох к периодам между ними – составляла около 10 °С, что на 1,5–2 °С превышает глобальную температуру в современную эпоху. Следовательно, рост температуры на Земле в последние 150 лет пока еще не вышел за рамки естественных процессов, характерных для всей последней геологической эпохи. В то же время наблюдаемый в настоящее время рост концентрации парниковых газов в атмосфере беспрецедентен для последних 440 тыс. лет. Современная концентрация CO₂ в атмосфере (379 ppm в 2005 г.) значительно превышает пределы естественных колебаний за последние 440 тыс. лет (180–300 ppm). Еще одним фундаментальным результатом является тот факт, что в течение данного времени изменения концентрации парниковых газов всегда следовали за колебаниями температуры, а не предварили их, причем сдвиг

концентрация удвоится, а температура вырастет на 1,5–6 °С. Большие погрешности делаемых оценок объясняются чрезвычайной сложностью климатообразующих процессов.

Главную неопределенность в расчеты вносит процесс моделирования отклика атмосферы на изменение концентрации парниковых газов – в первую очередь, двуокиси углерода. Так, по некоторым оценкам, океанический фитопланктон удаляет из атмосферы около половины углекислого газа. Однако увеличение фитопланктона, в свою очередь, зависит от температуры воды. Наличие многих других положительных и отрицательных обратных связей делает построение климатических моделей нетривиальной задачей. Если бы глобальное потепление полностью объяснялось антропогенными причинами, то

существовала бы тесная корреляция между повышением средней температуры Земли и мировым потреблением всех видов топлива. С 1860 г. по 2000 г. прослеживается только общая тенденция увеличения средней температуры Земли с ростом потребления топлива. Наблюдаемые значительные локальные повышения (и понижения) средней температуры Земли в рамках техногенной деятельности человека не объясняются, их следует приписать каким-то естественным причинам.

Чтобы оценить, насколько уникальны современные изменения климата, следует их сравнить с результатами исследований ледникового керна из скважины глубиной 3623 м на станции “Восток” в Антарктиде, полученными В.М. Котляковым (Земля и Вселенная, 2017, № 2; см. статью

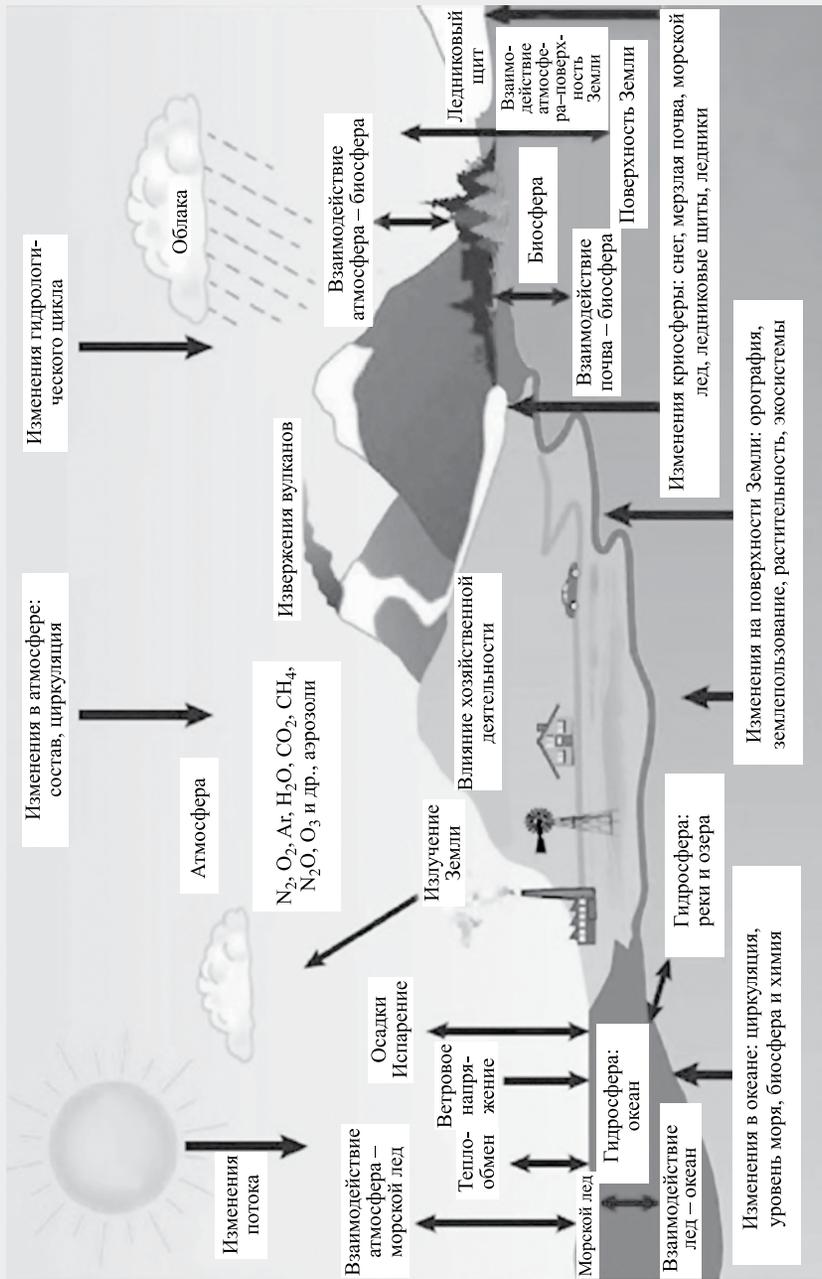


Схема взаимодействия составляющих климатической системы и основных климатообразующих процессов (по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, М.: Росгидромет, 2008).

по времени составлял несколько сотен лет. Такая последовательность событий ставит под сомнение возможность влияния производственной деятельности человека на глобальное потепление климата.

ВУЛКАНИЗМ И КЛИМАТ

Серьезные исследования последствий вулканической активности, оказывающей влияние на работу глобальной климатической системы, начались сразу после 27 августа 1883 г., когда в Индонезии произошла одна из крупнейших природных катастроф в истории человечества – извержение вулкана Кракатау, унесшего жизни более 36 тыс. человек. Перед извержением остров Кракатау имел высоту около 800 м и размеры 5×9 км. В результате взрыва, имевшего силу примерно 200 мегатонн в тротиловом эквиваленте, почти весь остров ушел под воду. Наряду с локальными

последствиями взрывного извержения, выброшенные на высоту 55 км пемза и мелкий пепел создали глобальный антипарниковый эффект за счет возросшего альбедо Земли. Это привело к тому, что через год после извержения средняя температура в мире снизилась на $1,2$ °С. Нормальные значения температуры восстановились только через 5 лет. Все эти годы даже в Европе во время заката лучи Солнца создавали на небосклоне пурпурно-бриллиантовый отблеск, что указывало на присутствие в атмосфере вулканической пыли.

По предположениям вулканологов, остров Кракатау возник в 535 г. в результате взрывного извержения еще более мощного вулкана. Произошло обрушение крупного участка поверхности, и образовался Зондский пролив, разделивший острова Яву и Суматру. В недавно изученных колонках

антарктического и гренландского льда в слоях, относящихся к 535–536 гг.н.э., отмечен скачок концентрации сульфатов, которые могли попасть в лед только из атмосферы. Это указывает на высокую концентрацию в атмосфере кислотных аэрозолей, обычно вулканического происхождения. По свидетельству дошедших до нас письменных источников, на протяжении 18 месяцев после катастрофического извержения 535 г. темные тучи закрывали солнечный свет, люди по всей планете страдали от голода и болезни. Затем наступили 30 лет невиданной засухи и наводнений, уничтоживших значительную часть населения Земли. В наше время катастрофа подобного масштаба может произойти в результате взрыва Йеллоустонского супервулкана в США.

Считается, что глобальное похолодание в Европе в 1315–1317 гг., вызвавшее “Великий голод”,

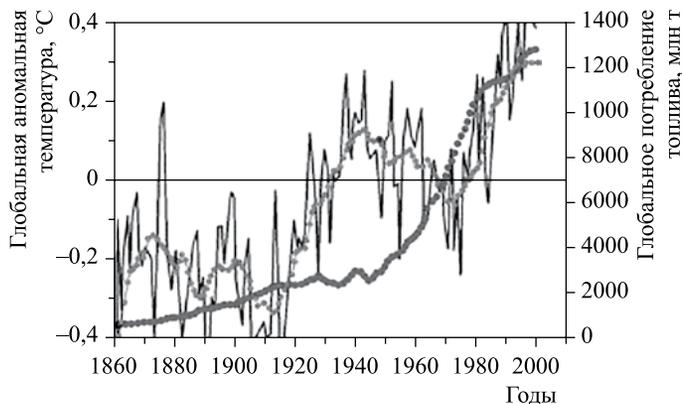


График зависимости роста глобальной температуры и мирового потребления топлива с 1860 г. по 2000 г. (Котляков В.М. О причинах и следствиях современных изменений климата // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 21). На правой оси – мировое потребление топлива (в млн тонн).

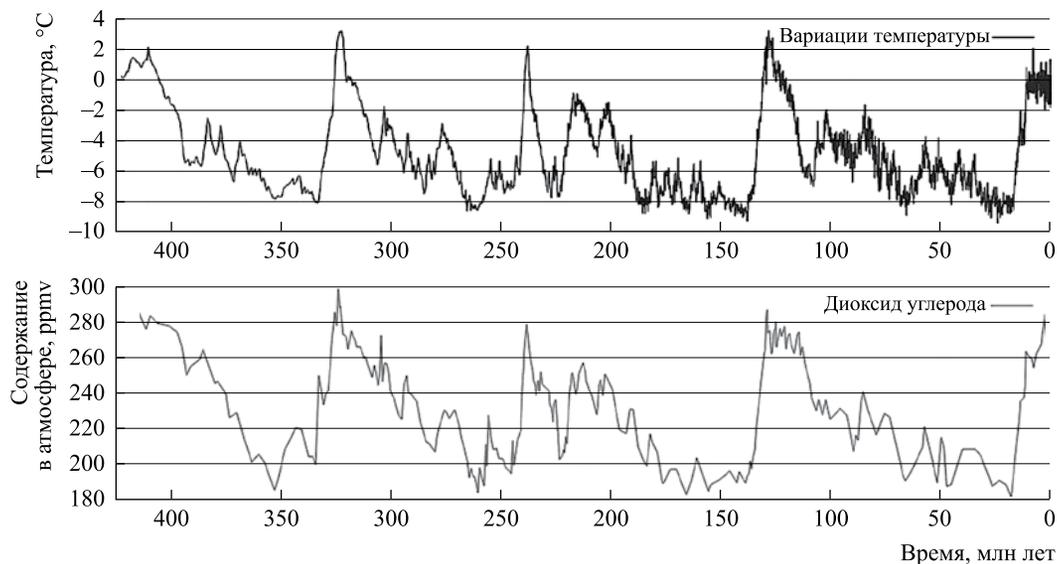


График зависимости колебания температуры (2-й график сверху) и содержания CO_2 (3-й график) за последние 440 тыс. лет (Котляков В.М. О причинах и следствиях современных изменений климата // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 21).

также было следствием продолжавшегося пять лет извержения вулкана Кахароа в Новой Зеландии. А экстремально холодные зимы в Северной Европе и гибель урожая винограда на юге в 1601–1602 гг., а также сильный голод на Руси в 1601–1603 гг., давший начало “смутному времени”, могли быть результатом сильнейшего за историческое время извержения вулкана Уайнапути в Перу 19 февраля 1600 г. Печально известному 1816 г. с необычайно холодным летом, когда погибли урожаи в Европе, Канаде и в США, получившему название “год без лета” (или “год нищеты”) предшествовало катастрофическое извержение вулкана

Тамбора в Индонезии 10–11 апреля 1815 г.

По данным Смитсоновского института (<http://volcano.si.edu>), за последние 10 тыс. лет было зафиксировано извержение 1509 вулканов. Наиболее достоверными считаются данные с 1600 г. по 2013 г. В эти годы наблюдался непрерывный рост извержений – от 2–3 в 1600 г. до 50 – в 2013 г. Отмечается, что в современный период суммарные выбросы углекислоты вулканами в 100 раз меньше антропогенных, поэтому вулканический парниковый эффект не может способствовать повышению глобальной температуры. Антипарниковый эффект (понижение температуры)

за счет вулканической пыли и диоксида серы (SO_2) перестает действовать через несколько лет после извержения. Таким образом, можно сделать вывод: влияние каждого сильного вулканического извержения на глобальный климат ограничено временем пребывания аэрозольного загрязнения в стратосфере и не превышает четырех-пяти лет. Чтобы похолодание климата длилось несколько тысяч лет, необходимо условие, при котором в течение всего этого времени (или, по крайней мере, в начале, до образования покровных ледников) каждый год взрывалось по нескольку вулканов такой мощности, как

Кракатау. Такого в геологической летописи не зафиксировано.

ПОДВОДНЫЕ ВУЛКАНЫ

Существует еще один важный аспект, связанный с вулканической активностью, который необходимо учитывать при расчетах теплового баланса земной поверхности. Это – вулканические выбросы, происходящие на дне океанов и морей. Извержения подводных вулканов, расположенных в очень глубоких местах океана, обычно незаметны, так как большое давление воды препятствует взрывным извержениям. Именно поэтому вплоть до конца XX в. подводные вулканы были мало изучены. Существующая в настоящее время база данных дна Тихого океана, созданная на основе анализа альтиметрических материалов, содержит информацию о примерно 150 тыс. подводных гор, многие из которых – действующие вулканы. Если произойдет усиление вулканической активности на обширном пространстве океанического дна, то это неизбежно приведет к потеплению Мирового океана и таянию льдов в Северном Ледовитом океане и ледников в Гренландии и Антарктиде. В результате уровень Мирового океана повысится и давление на дно возрастет,

что уменьшит поступление горячей вулканической магмы в океан; температура океана и воздуха начнет понижаться, и Северный Ледовитый океан снова покроется льдом. В Гренландии, Антарктиде, а также в приполярных областях Америки и Евразии возобновится рост ледников. Поскольку запаасаемая в ледниках вода изымается из океана – его уровень понизится, давление на дно уменьшится, и вулканическая активность снова начнет нарастать. Таким способом может осуществляться саморегулирующаяся цикличность великих оледенений. Известно, что в геологическом прошлом амплитуда колебаний уровня океана достигала 100–150 м. Если скорость изменения уровня океана была порядка 1 мм в год (современное значение – 1,7 мм в год), то для периода цикла великих оледенений получается значение порядка 100 тыс. лет. Как раз именно с таким периодом и происходили колебания температуры и концентрации CO_2 в плейстоцене.

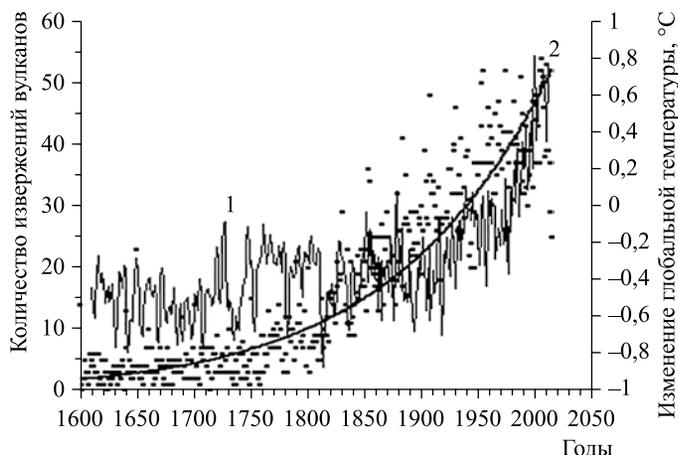
Поскольку причина надводного и подводного вулканизма общая – движение литосферных плит – можно предполагать, что изменения интенсивностей подводного и надводного вулканизма со временем происходят синхронно.

Следовательно, оба этих процесса можно описать одной и той же математической функцией. Это делает возможным использовать более достоверную базу данных о надводных вулканах при поисках корреляций тех или иных процессов на Земле с подводным вулканизмом. Пользуясь этим, мы провели сравнение изменения глобальной температуры с количеством надводных вулканических извержений и пришли к выводу, что наблюдаемое с конца XVIII в. быстрое глобальное потепление, по-видимому, в значительной мере обусловлено естественной причиной – нарастающей активностью подводных вулканов.

СОЛНЕЧНАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ И ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ

В литературе уже давно обсуждается вопрос о возможном влиянии солнечной активности на климатические изменения. Так, еще в 1801 г. знаменитый астроном Вильям Гершель (Земля и Вселенная, 2008, № 6) пытался сопоставить количество солнечных пятен с ценами на пшеницу в Англии, справедливо полагая, что цены зависели от урожайности, которая, в свою очередь, могла определяться солнечной активностью, индикатором которой считается количество пятен

График наблюдаемых изменений глобальной температуры (кривая 1; <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2013.510136>) и количества вулканических извержений (точки и аппроксимирующая кривая 2; по данным Смитсоновского института, <http://volcano.si.edu>). Быстрое потепление хорошо коррелирует с нарастающей активностью подводных вулканов.



на Солнце. До начала 1980-х гг., из-за нехватки фундаментальных знаний, вопрос о воздействии солнечной активности на климат оставался вне сферы внимания климатологов и астрофизиков. Ситуация кардинально изменилась в 1976 г., когда американский астроном Джон Эдди впервые обратил внимание на совпадение по времени “минимума Маундера” (почти полное отсутствие пятен с 1645 по 1715 г.; Земля и Вселенная, 2001, № 2; 2011, № 1) с серединой “малого ледникового периода” – необычайно холодной погоды в Европе и Северной Америке с XVI в. до начала XIX в. — льдом сковало русла рек Темзы и Дуная, замерзала вода в каналах Голландии, а зимние заморозки стали поражать даже северную Италию.

В 2000 г. голландский астроном К. де Ягер пер-

вым при изучении солнечно-климатических связей обратил внимание на то, что нужно учитывать две магнитно-активные области на поверхности Солнца: экваториальную зону – где проявляются тороидальные (вытянутые по долготе) магнитные поля – и полярную – связанную с полоидальными (проходящими через полюса Солнца) полями. Согласно теории магнитного динамо, в экваториальной зоне образуются солнечные пятна и “факелы”, а в полярной зоне возникают полярные “факелы”. К. де Ягер исследовал связь этих проявлений солнечной активности со среднегодовой приземной температурой. В результате проведенных расчетов он пришел к выводу, что изменение температуры Земли между 1600 г. и первой половиной XX в. примерно на 40% определялось солнечной

активностью. Он также отметил, что рост температуры, начавшийся примерно в начале XX в., по-видимому, – несолнечный и имеет другое – скорее всего, антропогенное происхождение.

ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ПОСТОЯННОЙ

Солнечная постоянная – это суммарный поток солнечного излучения, проходящий через площадку в 1 м², ориентированную перпендикулярно потоку и расположенную на расстоянии 1 а.е. (астрономическая единица, равная 150 млн км) от Солнца внеземной атмосферы. Косвенными методами установлено, что 4 млрд лет назад солнечная светимость была примерно на 30% ниже современной. Это означает, что на масштабах времени порядка сотен и тысяч лет ее изменением можно пренебречь. До начала космической эры



Замерзшая Темза. Картина художника Абрахама Хондиуса (1677). Британский музей в Лондоне.

(начавшейся 4 октября 1957 г.) определение величины суммарного потока солнечного излучения проводилось с поверхности Земли и потому результаты измерений были отягчены ошибками из-за атмосферных помех. К настоящему времени получен непрерывный ряд измерений солнечной постоянной, выполненных с 1978 г. по 2010 г. несколькими специальными космическими аппаратами для 21–23 циклов солнечной активности. Среднее внеатмосферное

значение солнечной постоянной оказалась равным 1367 Вт/м^2 , ее вариации в течение 11-летнего цикла солнечной активности имеют амплитуду около 1 Вт/м^2 – то есть 0,07% от ее величины (<http://www.pmodwrc.ch>). Такие малые изменения солнечной постоянной не могут быть причиной холодных периодов наподобие “малого ледникового”, поскольку модельные расчеты таких похолоданий требуют ее вариаций не менее 1%.

ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И КЛИМАТ

Результаты проведенных в последнее десятилетие исследований свидетельствуют о тесной связи площади облачного покрова, количества осадков и температуры тропосферы с интенсивностью галактических космических лучей (ГКЛ). Взрывы сверхновых звезд, а также квазары и пульсары – основной источник ГКЛ. В них ядра атомов водорода и гелия ускоряются до очень высоких энергий,

порядка 10^{12} МэВ. Проходя через атмосферу Земли, частицы взаимодействуют с атомами и молекулами воздуха, в результате чего образуются вторичные космические лучи – преимущественно нейтроны. Сравнение особенностей поведения долговременного ГКЛ, начатое в конце 1950-х гг. с помощью Всемирной сети станций с нейтронными мониторами показало, что в потоке ГКЛ наблюдается отчетливый 11-летний цикл, находящийся в противофазе с солнечным циклом. Объясняется это тем, что по пути из межзвездного пространства к Земле ГКЛ проходят сквозь гелиосферу – околосолнечное пространство, заполненное движущимся в радиальном направлении от Солнца ионизованным газом – солнечным ветром. Он содержит в основном ядра атомов водорода и электронов. Захватывая и унося с собой солнечное магнитное поле, солнечный ветер создает в околосолнечном пространстве межпланетное магнитное поле (ММП). В период высокой солнечной активности скорость и плотность солнечного ветра значительно возрастает, а его магнитное поле усиливается и становится сильно неоднородным. Такое магнитное поле затрудняет проникновение частиц космических лучей в гелиосферу.

В результате в периоды высокой активности Солнца поток ГКЛ снижается на 10–15% по отношению к его значению в минимумах циклов.

Рассмотрим процессы, протекающие в тропосфере под воздействием ГКЛ в минимуме солнечного цикла. Проходя через атмосферу Земли, вторичные нейтроны быстро теряют энергию в результате многократных столкновений с аэрозольными частицами и “прилипают” к ним, создавая дополнительные ядра конденсации. Образующиеся на них мелкодисперсные капли воды формируют облака, сильнее отражающие солнечный свет, чем облака из более крупных капель. В результате альбедо Земли увеличивается и температура падает. Кроме того, за счет снижения количества водяного пара, “перешедшего” в капельно-жидкое состояние, уменьшается парниковый эффект, что приводит к дополнительному понижению температуры. Предполагается также, что мелкодисперсные капли воды за счет меньшего веса быстро поднимаются на большую высоту, в результате чего в тропосфере возникает завихренность, генерирующая повышенную циклоническую активность.

При повышенной солнечной активности, когда поток ГКЛ ослаблен, количество ядер

конденсации снижается, и облаков становится меньше. Возросшая освещенность земной поверхности повышает приземную температуру, что приводит к усилению парникового эффекта за счет дополнительного испарения воды. В результате приземная температура еще больше повышается.

Таким образом, можно ожидать, что вблизи максимумов солнечных циклов ясных дней летом и зимой должно быть больше, а осадков – меньше. При этом летние температуры должны быть выше многолетних средних значений, а зимы – более холодными. В минимумах циклов (когда возросший поток ГКЛ образует большее количество ядер конденсации) лето должно быть преимущественно дождливым и прохладным, а зима – снежной и с умеренными морозами. В тех случаях, когда по диску Солнца проходит корональная дыра (обширная область на Солнце с “открытыми” магнитными полями), происходит усиление солнечного ветра, и в течение нескольких суток процессы в тропосфере протекают по сценарию повышенной солнечной активности. Если минимум солнечного цикла вместо обычных нескольких лет растянется на несколько десятков лет (как это было для “минимума Маундера”), то может наступить

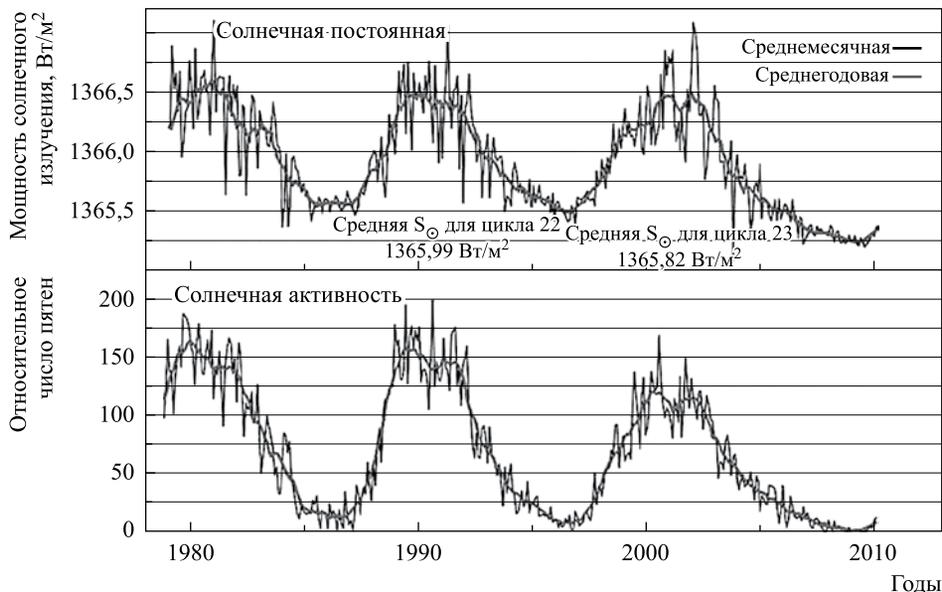


График зависимости результатов спутниковых измерений солнечной постоянной, выполненных с помощью спутников и чисел Вольфа (по данным сайта Мирового радиационного центра, Швейцария: www.rpodwrc.ch). По оси ординат отложены значения солнечной постоянной.

очередной “малый ледниковый период”.

“ОРБИТАЛЬНАЯ” ТЕОРИЯ КЛИМАТА

Инсоляции Земли зависят не только от активности Солнца, но и от некоторых элементов орбиты Земли. Первым “орбитальную” гипотезу изменения климата высказал в 1842 г. французский математик Ж. Адемар, а в 1875 г. был опубликован фундаментальный труд на эту тему английского ученого Дж. Кролля. Но наиболее заметный вклад в развитие орбитальной теории внес сербский исследователь М. Миланкович, который в 1930 г. провел расчеты приходящей на

Землю солнечной радиации с учетом медленных вариаций эксцентриситета, наклона оси вращения и долготы перигелия земной орбиты, происходящими с периодами от десятков тысяч до 100 тыс. лет. Он предположил, что именно эти процессы приводили в прошлом к повторяющимся великим оледенениям. Однако на основании анализа климатообразующих процессов можно сделать вывод, что причиной великих оледенений с периодом порядка 100 тыс. лет могли быть не только медленные изменения элементов орбиты Земли (экзогенные процессы), но также и извержения

подводных вулканов (эндогенные процессы).

Отдельного внимания заслуживает необычно быстрый рост приземной температуры, который принято связывать с антропогенными выбросами двуокси углерода, в последние 150 лет. Действительно, на основании изучения ледяных кернов из глубоких скважин Антарктиды и Гренландии утверждается, что наблюдаемый в настоящее время рост концентрации парниковых газов в атмосфере беспрецедентен для последних 440 тыс. лет. Тем не менее, несмотря на это, глобальная температура в современную эпоху все еще на 1,5–2 °C ниже,

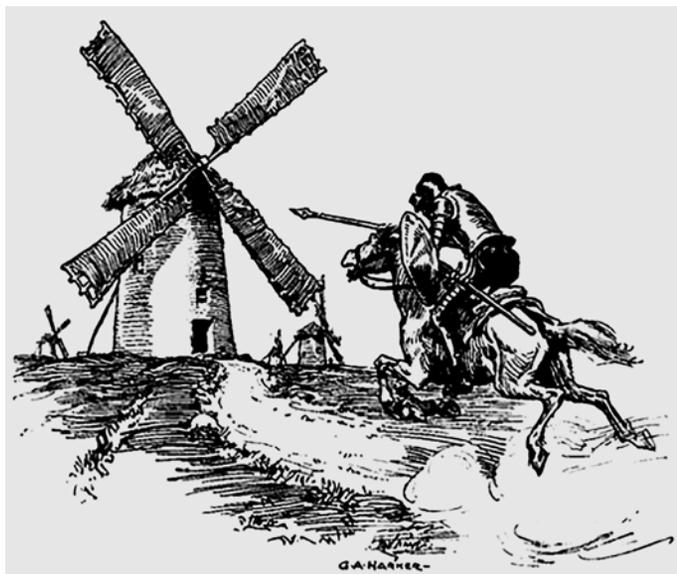


Иллюстрация Дж. Харкера к роману Мигеля де Сервантеса "Хитроумный идальго Дон Кихот Ламанчский" (1605, 1615).

и таяние арктических льдов указывают на то, что в ближайшем будущем глобальное потепление должно прекратиться и на смену ему придет очередной период похолодания. Следовательно, прежде чем проводить в жизнь дорогостоящие проекты по сдерживанию глобального потепления, необходимо убедиться, что это не будет напоминать сражение с ветряными мельницами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-07590).

чем была в три предыдущие междуледниковые эпохи, предшествовавшие голоцену. А это значит, что колебания температуры на Земле пока еще "не выходят за рамки" естественных изменений, характерных для всей последней геологической эпохи (Котля-

ков В.М., 2012). К этому следует добавить, что, согласно проведенному авторами анализу, основной причиной современного глобального потепления может быть подводный вулканизм. Усилившиеся в последнее время сокращение ледовых покровов