

УДК 550.338.2, 551.51, 551.583

ВЛИЯНИЕ ПОТОКА ПОЛНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА КЛИМАТ ЗЕМЛИ

© 2019 г. Л. З. Бикташ*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия*

**e-mail: lilia_biktash@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.04.2017 г.

После доработки 24.04.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Представлены результаты анализа вариаций потока полной солнечной радиации в 17–24-м циклах солнечной активности и их связи с глобальным потеплением климата. Рассмотрено влияние галактических космических лучей и вулканической активности на климат. Показано, что температура Земли в 17–20-м циклах испытывала вариации в соответствии с ходом солнечной активности без наблюдаемого тренда: температура росла с ростом солнечной активности и спадала в солнечных минимумах. Глобальное потепление началось в 1976 г. в 21-м цикле солнечной активности. С учетом наблюдаемого тренда в 21–24-м циклах солнечной активности, изменения глобальной температуры Земли, так же как и в 17–20-м циклах, были связаны с циклическими вариациями потока полной солнечной радиации. Галактические космические лучи, изменяя прозрачность атмосферы на фоне понижений потока полной солнечной радиации, дополнительно способствовали увеличению температурных минимумов. Сильные вулканические извержения сопровождалось 1–2-х годовичными понижениями температуры, которые не нарушали циклического процесса изменения климата Земли. В отсутствие трендов в космофизических факторах, влияющих на климат, процесс постепенного роста средней годовой температуры Земли в 21–24-м циклах солнечной активности объясняется антропогенным фактором.

DOI: 10.1134/S0016794019030052

1. ВВЕДЕНИЕ. ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА ЗЕМЛИ

В последние годы многочисленные исследования посвящены глобальному потеплению климата, которое наблюдается как процесс постепенного роста средней годовой температуры поверхности Земли и Мирового океана. Для объяснения причин глобального потепления привлекаются обширные экспериментальные наблюдения, построены модели изменений климата и выдвинуто множество теорий. К основной причине изменения климата Земли относят солнечную активность. Важным элементом сложной цепи действия Солнца на климат является опосредованное влияние его активности через гелиосферный токовый слой, который модулирует различные процессы, происходящие в межпланетном пространстве, атмосфере Земли и в ее недрах. Одновременное, часто противоположное, действие многих космофизических и геофизических факторов, особенно в 11 летнем цикле солнечной активности, усложняет картину атмосферных процессов, обуславливающих климатические изменения. Подробный анализ экспериментальных

данных и механизмов воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры приведен в обзоре [Пудовкин и Распопов, 1992]. Следует отметить, что эта основополагающая работа способствовала развитию целого направления климатических исследований не только в России, но и за рубежом. Тем не менее, вопрос о физическом механизме влияния солнечной активности на климат продолжает оставаться открытым, поскольку наблюдается слишком высокая скорость климатических изменений, происходящих в последние десятилетия. Интенсификация антропогенной деятельности оказывают заметное влияние на химический состав атмосферы нашей планеты в сторону увеличения содержания в ней парниковых газов и повышению температуры. Вулканическая активность, наоборот, понижает температуру. По-видимому, имеющее место в настоящее время глобальное потепление является результатом действия многих факторов, которые требуют детального изучения и контроля.

Основные климатические изменения происходят на Земной поверхности и нижних слоях ат-

мосферы – тропосфере, где сосредоточено около 80% всей массы атмосферного воздуха и около 90% всего имеющегося в атмосфере водяного пара. В этом тонком слое образуются облака и возникают другие метеорологические явления, которые непосредственно получают энергию от Солнца. Eddy [1976] предположил, что основным источником тепла и климатических изменений для поверхности Земли является поток полной солнечной радиации (total solar irradiance – TSI). Под потоком полной солнечной радиацией (ПСР) понимается вся совокупность лучистой энергии, посылаемой Солнцем. Большая часть полного потока солнечной радиации, особенно наиболее изменчивое ультрафиолетовое излучение Солнца, поглощается высокими слоями атмосферы Земли. Полный поток солнечной радиации измеряется Вт/м² на спутниках вне атмосферы Земли, на площадке в 1 м², которая располагается перпендикулярно потоку излучения на расстоянии одной астрономической единицы от центра Солнца. Как показали [Lean and Fröhlich, 1998], поток полной радиации Солнца усиливается в присутствии солнечных пятен и ярких фотосферных факелов. Однако, как отмечают многие исследователи [Lean and Rind, 1998; Douglass and Clader, 2002], вариации в ПСР недостаточны для количественного объяснения наблюдаемого глобального потепления климата.

Глобальное потепление климата уже на данный момент во многих районах Земли приводит к разрушительным последствиям, таких как затопление прибрежных территорий в результате поднятия уровня мирового океана, пожарам, миграции животных и к другим катаклизмам. В связи с этим, целью данной работы является исследование изменения потока полной солнечной радиации в циклах солнечной активности и возможное влияние этого процесса на климат Земли. В статье рассматривается как непосредственное воздействие полной солнечной радиации на климат, так и опосредованное воздействие Солнца на климат через гелиосферный токовый слой и космические лучи. Представлены результаты сопоставления потока полной солнечной радиации, вулканической активности и годовых вариаций глобальной температуры Земли в 17–24-м солнечных циклах.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ

В работе использованы среднегодовые значения глобальной температуры воздуха (ГТ) в градусах Цельсия с сайта <http://data.giss.nasa.gov/> и полной солнечной радиации (ПСР) с сайта <https://www.ngdc.noaa.gov/>. Среднегодовые числа солнечных пятен получены с сайта <http://www.sidc.be/>. Наклон гелиосферного токового слоя рассчитан по среднемесячным данным модели солнечной обсерватории Уилкокса Стен-

фордского университета <http://wso.stanford.edu/>; среднегодовые значения галактических космических лучей по наблюдениям ИЗМИРАН взяты с сайта <http://www.izmiran.ru/>. Температурный тренд с 1976–2016 гг. рассчитывался методом наименьших квадратов, аппроксимированной линейной функцией $y = bx + a$, где y – среднегодовая глобальная температура воздуха, x – годы наблюдения.

3. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМЛИ В 17–24-М ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Солнечные пятна – единственный прямой метод изучения эволюции солнечного цикла в течение нескольких веков. Начиная с 1700 г. по настоящее время, стабильность 11-летнего цикла солнечной активности сохраняется. Интерес к влиянию солнечной активности на климат не угасает со времени открытия солнечных пятен. В ранних исследованиях наиболее известным и веским аргументом в пользу влияния солнечной активности на погоду и климат был факт изменения с солнечным циклом ширины годовых колец на срезах многолетних деревьев. С началом спутниковой эры и исследованием Арктики и Антарктики появились новые доказательства. В связи с глобальным потеплением, которое уже приводит к катастрофическим последствиям, вопрос об изменении температуры Земли в связи с солнечной активностью приобрел особую значимость.

Поскольку поток полной солнечной радиации тесно связан с солнечной магнитной активностью [Lean and Fröhlich, 1998], то в соответствии с этой связью были развиты и модели реконструкции ПСР [Fligge and Solanki, 2000; Oster et al., 1982]. Поэтому, естественно предположить, что поток полной солнечной радиации является непосредственным и основным источником, который определяет и регулирует многие атмосферные процессы, в том числе и температуру тропосферы. Попытки обнаружить связь между 11-летним циклом ПСР и глобальной температурой были предприняты в ряде работ. Так Камп и Тунг [Camp and Tung, 2007], используя данные за 1959 – 2004 гг., впервые обнаружили 11-летний эффект потока полной солнечной радиации, изменения которого составили 0.2 К от солнечного максимума до солнечного минимума. В расчетах авторы пользовались методом Монте-Карло, температурный тренд рассчитывался по данным NCER (<http://www.ncer.noaa.gov/>) начиная с 1959 г. В наших работах [Bikdash, 2014, 2017], температурный тренд рассчитывался с 1965–2014 гг. методом наименьших квадратов. Вариации глобальной температуры в среднем составили $\pm 0.1^\circ\text{C}$, достигая максимальных значений в максимумах сол-

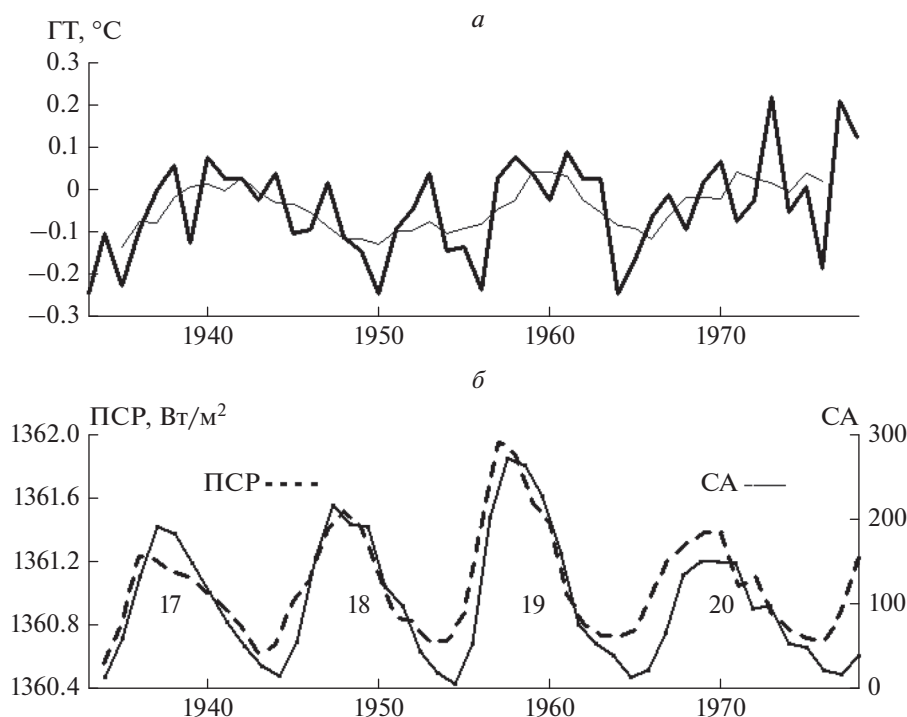


Рис. 1. Солнечная активность, поток полной солнечной радиации и изменения глобальной температуры Земли в 17–20-м циклах солнечной активности: (а) — сплошная жирная кривая, глобальная температура Земли ГТ, тонкая линия — 5 летняя скользящая средняя температура ГТ; (б) — сплошная кривая, среднегодовые значения солнечных пятен (СА), штриховая кривая, поток полной солнечной радиации (ПСР).

нечной активности. Разногласия в температурах по [Camp и Tung, 2007] и [Biktash, 2014, 2017] могут быть обусловлены как методами расчета температурного тренда, так и использованием данных с разных источников. Кроме того, мы использовали непосредственные среднегодовые значения глобальной температуры в градусах Цельсия, в то время как расчетах в [Camp and Tung, 2007] используется шкала Кельвина.

В связи с этими разногласиями рассмотрим сначала изменения глобальной температуры и солнечную активность, выраженную как число солнечных пятен и ПСР в 17–20-м циклах солнечной активности. В верхней части рис. 1 представлены среднегодовые значения глобальной температуры воздуха (ГТ) с 1933–1976 гг., в нижней части рис. 1 представлены вариации числа солнечных пятен, отражающих солнечную активность и ПСР. Отчетливо видно, что в 17–20-м циклах солнечной активности глобальная температура колеблется в пределах $+0.05^{\circ}\text{C}$ и -0.25°C . На график нанесены также скользящие 5-летние средние значения глобальной температуры воздуха. В представленный период температура растет с ростом солнечной активности и спадает в минимумах СА, колеблясь в пределах от -0.1°C до 0.05°C без видимой тенденции к повышению. Таким образом, в четырех циклах СА глобальная

температура изменялась в соответствии с фазами солнечных циклов. Значительный подъем температуры, не связанный с СА, наблюдается после температурного и солнечного минимумов с начала нового 21-го цикла в 1976 г. Таким образом, связь глобальной температуры и солнечной активности в 17–20-м циклах солнечной активности позволяют предположить, что и в следующих циклах солнечная активность будет циклически влиять на изменения температуры Земли, а наблюдаемый с 1976 г. температурный тренд может быть обусловлен другими причинами.

Для более четкого выделения циклических вариаций глобальной температуры (ГТ) в 21–24-м циклах солнечной активности необходимо вычесть явно выраженный температурный тренд, который представлен на рис. 2а жирной кривой на фоне циклических вариаций ПСР. Наши расчеты показывают, что температурный тренд можно удалить, используя уравнение регрессии, где тренд глобальной температуры (ГТ) выражается как:

$$Y = 0.018X + 0.053, \quad R = 0.84, \quad \delta = 0.09, \quad (1)$$

где X — номера лет с начала 1976 г. Заметим, что уравнение (1) отличается от полученного уравнения в работе [Biktash, 2017], где тренд рассчитывался с начала 20-го цикла солнечной активности.

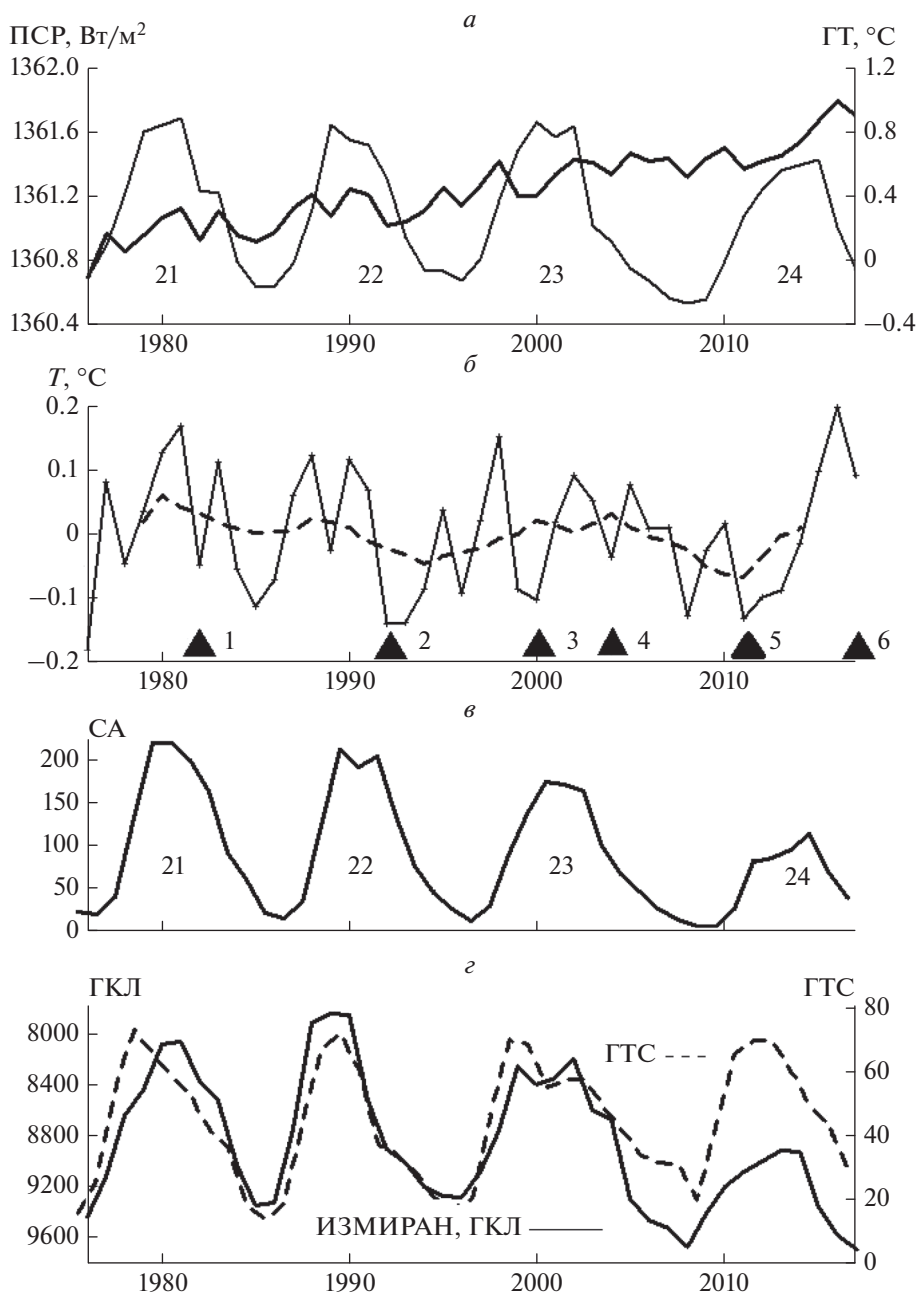


Рис. 2. Вариации потока полной солнечной радиации ПСП (тонкая линия) и ГТ (жирная линия — (а). Вариации ГТ с учетом тренда, обозначенные как $T^{\circ}\text{C}$ вариации (сплошная кривая) с 1976–2017 гг., штриховая кривая — 7 летние скользящие средние значения температуры $T^{\circ}\text{C}$ — (б). Среднегодовые значения солнечных пятен (СА) с 1976–2017 гг. — (в). Среднегодовые вариации скорости счета галактических космических лучей по наблюдениям ИЗМИРАН, штриховая кривая — среднегодовые значения угла наклона гелиосферного токового слоя в 21–24 циклах СА — (г).

На рисунке 2б сплошной кривой показаны значения глобальной температуры с 1976–2017 гг. с учетом тренда по формуле (1) и обозначенные как $T^{\circ}\text{C}$, пунктирная линия (рис. 2б) 7-ми летние скользящие средние значения $T^{\circ}\text{C}$. Минимальная $T^{\circ}\text{C}$ в представленных циклах составляет -0.15°C , максимум $T^{\circ}\text{C} = +0.15^{\circ}\text{C}$, а средняя $T^{\circ}\text{C}$ колеблется около 0°C . Как видно из рис. 2б, 7-летние

скользящие средние $T^{\circ}\text{C}$ не превышали значений $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$.

Предполагая, что основным источником тепла и климатических изменений на поверхности Земли является поток полной солнечной радиации ПСП, рассмотрим рис. 2а–с, где представлены вариации ГТ, Т, ПСП и солнечная активность (СА) как число солнечных пятен в 21–24-м циклах сол-

нечной активности. Наблюдается очевидная корреляция T , ПСР и СА в представленных циклах. Температурные максимумы в T соответствуют максимальным значениям полной солнечной радиации, а периоды температурных вариаций совпадают с периодами вариаций ПСР. Продолжительный 23-й солнечный цикл обуславливает и продолжительные температурные вариации.

Полученные результаты подтверждают гипотезу, предложенную Eddy [1976], и могут быть интерпретированы как непосредственное действие ПСР на нижнюю атмосферу и климат Земли. Дополнительные внешние и внутренние причины, которые могут повлиять на рост глобальной температуры, будут рассмотрены в следующей главе.

3. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ГЕЛИОСФЕРНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ И ВУЛКАНЫ В 21–24-М ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Влияние галактических космических лучей (ГКЛ) и вулканов на климат остается одним из спорных и обсуждаемых механизмов их воздействия на атмосферу. Непосредственным доказательством влияния космических лучей на формирование облачности явилась камера Вильсона, которая была изобретена еще в начале 20-го века. При появлении в камере перенасыщенного пара каких-либо центров конденсации (в частности ионов, сопровождающих след быстрой заряженной частицы) на них образуются мелкие капли жидкости. Следующим важным доказательством влияния космических лучей на атмосферу явилось открытие Форбуша в 1937 г. Он обнаружил, что скорость счета галактических космических лучей понижается во время магнитных бурь и с ростом солнечной активности. Основываясь на этих открытиях и учитывая глубокую проникающую способность космических лучей, многие исследователи заметили, что изменения климата связаны с интенсивностью галактических космических лучей гораздо более тесно, чем с другими проявлениями солнечной активности. Пудовкиным и Распоповым [1992] был предложен механизм действия космических лучей на атмосферу, который объясняет непрерывные изменения метеопараметров и климата. Этот механизм основан на известном факте способности космических лучей изменять прозрачность атмосферы. Предложенный механизм активно обсуждается в многочисленных работах и считается одним из основных механизмов, ответственных за изменения климата. Так, в работах [Pudovkin and Veretenenko, 1995; Tinsley, 2000; Svensmark, 2000] показано, что облачный покров Земли в значительной степени подвержен влиянию космических лучей, а основной причиной вариаций космических лучей является изменчивость солнечной активности и структуры его магнитного поля. Как показа-

но в работе [Ferreira et al., 2003], изменение потоков ГКЛ связаны со структурой гелиосферного токового слоя и углом его наклона относительно оси вращения Солнца. Нарушение связи облачности с космическими лучами, которое наблюдается с начала 2000 г., Svensmark and Friis-Christensen [2007] объяснили влиянием вулканической активности, а уменьшение количества воды в нижних облаках, иначе, уменьшение концентрации аэрозоля авторы [Svensmark et al., 2009] связали с Форбуш понижениями ГКЛ. Данные по уменьшению концентрации аэрозоля в момент Форбуш понижений были получены в ходе выполнения проектов MODIS, ISCCP и AERONET. [Веретененко и Огурцов, 2017] показали, что данное нарушение обусловлено резким ослаблением циркумполярных вихрей.

Несмотря на достаточно убедительные доказательства влияния космических лучей на климат, необходимы дополнительные исследования данной проблемы. На рисунке 2д представлены среднегодовые вариации скорости счета ГКЛ (скорость счета спадает по оси X) по наблюдениям ИЗМИРАН. Здесь же пунктиром нанесены среднегодовые вариации угла наклона гелиосферного токового слоя (ГТС), рассчитанные по модели солнечной обсерватории Стенфордского университета. Из сравнения графиков, представленных на рис. 2 можно сделать следующие выводы. Минимумы температуры $T^{\circ}\text{C}$ (скользящие 7 летние средние, пунктирная жирная кривая на панели b) и минимумы ПСР (панель a) совпадают с максимальными значениями скорости счета космических лучей. Этот результат не отвергает механизм действия космических лучей на климат: в минимумах солнечных циклов наблюдается максимальное воздействие космических лучей на атмосферу Земли, даже если поток полной солнечной радиации испытывает очень малые вариации в цикле активности ($\sim 1 \text{ Вт/м}^2$) или может быть постоянной величиной – (прежнее название потока полной солнечной радиации – солнечная постоянная). В длительном 23-м цикле солнечной активности, при примерно одинаковых значениях ПСР с 21–23-й солнечные циклы, потоки космических лучей были значительно выше по сравнению с 21-м и 22-м циклами СА, что, по-видимому, понизило среднюю температуру в данном цикле. Средняя температура T колебалась около 0°C , тогда как в максимумах с 21–22-й цикл она достигала значений 0.05°C . Значительное понижение температуры наблюдалось в 2008 г., когда поток космических лучей достиг максимума, а затем, с началом 24-го цикла СА, температура начала повышаться с повышением полной солнечной радиации и понижением потоков космических лучей. Таким образом, космические лучи, вследствие различия их скоростей счета в цик-

лах СА, в разной степени влияют на прозрачность атмосферы.

В максимумах СА, потоки космических лучей рассеиваются, и, их поток уменьшается вследствие изменения наклона гелиосферного токового слоя. В результате, атмосфера более прозрачна для проникновения потока полной солнечной радиации вследствие малого потока космических лучей, что приводит к повышению температуры. В минимуме СА, когда узкий гелиосферный токовый слой вблизи плоскости эклиптики не оказывает существенного влияния на потоки ГКЛ, происходит снижение температуры в результате усиления потоков космических лучей, которые понижают проникающую способность атмосферы для солнечной радиации. Таким образом, потоки ГКЛ модулируют глобальную температуру, дополнительно понижая ее в годы минимумов СА и повышая в годы максимумов СА.

Вулканическая активность является источником поступления в атмосферу Земли аэрозолей серной кислоты и большого количества углекислого газа, что также может значительным образом сказаться на климате Земли [Robock, 2000]. Крупные извержения сопровождаются похолоданием, вследствие поступления в атмосферу Земли аэрозолей серной кислоты и частиц сажи, которые приводят к уменьшению прозрачности атмосферы, а значит и понижению температуры на планете. Так, понижения температуры, обозначенные треугольниками на рис. 2б, можно объяснить активностью следующих вулканов: 1 — Эль Чичон, 2 — Пинатубо, 3 — Улван, 4 — Манам, 5 — Эйяфьятлайокудль, 6 — Агунг. Глубокое понижение $T^{\circ}\text{C}$ в 1982 г. произошло в минимуме ПСР на который наложился эффект вулкана Эль Чичон. Вследствие извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. температура $T^{\circ}\text{C}$ опустилась до -0.15°C . В марте 2010 г. проснулся вулкан Эйяфьятлайокудль, а 14 апреля началось новое извержение, сопровождавшееся выбросом в атмосферу огромного количества пепла, которое завершилось 23 мая 2010 г. Результатом действия этого вулкана явилось длительное понижение температуры, почти до 2012 г. Как показывают исследователи вулканической активности в солнечных циклах [Барляева и др., 2009; Barlyaeva, 2013], индекс вулканической активности повышается на спадах циклов СА, что дополнительно понижает температуру при понижении потока полной солнечной радиации.

Таким образом, мощные вулканические извержения способны менять климат Земли, практически не меняя циклической зависимости глобальной температуры от СА. Понижения температуры длятся в течение 1–2 лет, но это происходит крайне редко, обычно по одному крупному извержению за солнечный цикл. Кроме того, землетрясения и вулканы, по-видимому, тесно свя-

заны с солнечной активностью, на что указывает усиление индекса вулканической активности на спадах солнечных циклов [Barlyaeva, 2013]. Фазы спадов солнечных циклов сопровождаются высокоскоростными потоками солнечного ветра, которые обуславливают длительные рекуррентные геомагнитные бури и могут быть также причиной сейсмической и вулканической активности. Таким образом, в отсутствие трендов в космофизических явлениях, влияющих на процесс постепенного роста средней годовой температуры Земли в 21–24-м циклах солнечной активности, основной причиной глобального потепления остается антропогенный фактор.

5. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования поведения глобальной температуры с 1933–1975 гг. показали, что температура Земли в 17–20-м циклах испытывала вариации в соответствии с ходом солнечной активности без наблюдаемого тренда: температура росла с ростом солнечной активности и спадала в солнечных минимумах. Исключение наблюдаемого с 1976–2017 гг. температурного тренда доказывает, что циклический процесс изменения климата Земли не нарушается и в 21–24-м циклах СА. Таким образом, мы можем заключить, что циклические вариации глобальной температуры связаны с солнечной активностью и объясняются механизмом действия потока полной солнечной радиации на атмосферу Земли, модулируемой галактическими космическими лучами, потоки которых регулируются гелиосферным токовым слоем. Мощные вулканические извержения способны менять климат Земли, понизить ее температуру на 1–2 года, но они не нарушают цикличность изменения глобальной температуры. В отсутствие трендов в космофизических факторах, влияющих на климат, процесс постепенного роста средней годовой температуры Земли в 21–24-м циклах солнечной активности объясняется антропогенным агентом. Бесконтрольная человеческая деятельность оказывается мощным фактором, способным влиять на тонкий слой атмосферы, где происходят основные изменения климата. В связи с этим, возникает суровая необходимость тщательного изучения влияния антропогенного фактора на климат для предотвращения катастрофических изменений на планете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барляева Т.В., Миронова И.А., Понявин Д.И. О природе декадной вариации в климатических данных второй половины XX в. // Докл. РАН. Т. 425. № 3. С. 395–399. 2009.
- Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Аномалии нижней облачности в умеренных широтах и их связь с вариациями галактических космических лучей при различ-

- ных состояниях циркумполярного вихря // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 81. С. 266–269. 2017.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 5. С. 1–20. 1992.
- Barlyaeva T.V., External forcing on air-surface temperature: Geographical distribution of sensitive climate zones // J. Atmos. Solar Terr. Phys. V. 94. P. 81–92. 2013.
- Biktash L.Z. Evolution of Dst index, cosmic rays and global temperature during solar cycles 20–23 // Adv. Space Res. V. 54. P. 2525–2531. 2014.
- Biktash L.Z. Sun and space weather influence on global temperature by the agency of cosmic rays during the solar cycles 19–23/Astronomical society of the Pacific/Ground-based solar observations in the space instrumentation era. Ed. I. Dorotovic, C. Fischer and M. Temmer. V. 504. P. 265–268. 2016.
- Camp Ch.D., Tung K.K. Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection // Geophys. Res. Lett. V. 34. L14703. 2007.
- Douglass D.H., Clader B.D. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance // Geophys. Res. Lett. V. 29. № 16. 2002. doi 10.1029/2002GL015345
- Eddy J.A. The Maunder Minimum // Science V. 192. P. 1189–1202. 1976.
- Ferreira S., Potgieter M.S., Heber B., Fichtner H. Charge-sign dependent modulation in the heliosphere over a 22-year cycle // Ann. Geophys. V. 21. P. 1359–1366. 2003.
- Fligge M., Solanki S.K. The solar spectral irradiance since 1700 // Geophys. Res. Lett. V. 27. № 14. P. 2157–2160. 2000.
- Lean J., Fröhlich C. Solar total irradiance variations // In Synoptic Solar Physics. Eds. Blasubramaniam K., Harvey J., and Rabin D. // ASP Conf. Ser. V. 140. P. 281–292. 1998.
- Lean J., Rind D. Climate Forcings by Changing Solar Radiation // J. Climate. V. 11. P. 3069–3094. 1998.
- Oster L., Sofia S., Schatten K. Solar irradiance variations due to active regions // Astrophys. J. V. 256. P. 768–773. 1982.
- Robock A. Volcanic eruptions and climate // Rev. Geophys. V. 38. P. 191–219. 2000.
- Svensmark H. Cosmic rays and Earth's climate // Space Sci. Rev. V. 93. P. 175–185. 2000.
- Svensmark H., Bondo T., Svensmark J. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds // Geophys. Res. Lett. V. 36. Is. 15. 2009. doi 10.1029/2009GL038429
- Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere // Space Sci. Rev. V. 94. P. 231–258. 2000.