

УДК 551.583: 551.590

**ВЛИЯНИЕ ВНЕЗЕМНЫХ ФАКТОРОВ НА КЛИМАТ:
ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ И
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

А.В. Елисеев, И.И. Мохов

Институт физики атмосферы РАН им. А.М. Обухова,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3,
eliseev@ifaran.ru, mokhov@ifaran.ru

Резюме. Анализируются механизмы воздействия внеземных факторов (исключая циклы Миланковича) на климат. В частности, рассматривается их вклад в климатические вариации последних столетий и XXI века. По современным оценкам, вклад радиационного возмущающего воздействия (РВВ) из-за интегрального по спектру изменения потока солнечной радиации в климатические изменения последних десятилетий относительно мал. В ряде климатических моделей учитывается косвенный механизм климатического воздействия солнечной активности, связанный с влиянием ультрафиолетового излучения и потока высокоэнергетических частиц от Солнца на содержание O_3 в атмосфере с формированием соответствующего РВВ. Ряд предложенных косвенных механизмов связан с возможным влиянием космических лучей и потоков частиц от Солнца (интенсивность потоков от обоих источников модулируется солнечным ветром) на число ядер конденсации в атмосфере и, как следствие, на характеристики облачности. Значение этих механизмов для вариаций климата, однако, требует более детального экспериментального и теоретического обоснования.

Ключевые слова: земная климатическая система, внеземные воздействия, солнечная активность, радиационное возмущающее воздействие, атмосферный озон, вариации облачности, галактические лучи, климатические модели.

**EXTRA-TERRESTRIAL FACTORS' INFLUENCE ON
CLIMATE: POSSIBLE MECHANISMS AND MODELING
RESULTS**

A.V. Eliseev, I.I. Mokhov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS,
3 Pyzhevsky, 119017, Moscow, Russia,
eliseev@ifaran.ru, mokhov@ifaran.ru

Summary. Mechanisms of extra-terrestrial influences on the Earth climate are summarised along with their contribution to the climate variations of the last several centuries as well as in the 21st century. According to the latest estimates, the contribution of the radiative forcing due to changes of the total solar irradiance into the climate changes during the last decades is relatively small. Some climate models implement also an indirect mechanism of solar activity influ-

ence on the Earth climate, which is related to the impact of UV radiation and fluxes of high-energy particles of Solar origin on the O_3 atmospheric content; the latter also leads to the development of the specific radiative forcing. A number of suggested additional indirect mechanisms is related to possible impact of galactic rays and fluxes of high-energy solar particles (intensities of both fluxes are modulated by the solar wind) on the number of cloud condensation nuclei in the atmosphere, and, thus, on the characteristics of cloudiness. A role, which the latter mechanisms play in the climate variations, however, needs more detailed experimental and theoretical evidence.

Keywords: Earth system, extra-terrestrial influences, solar activity, radiative forcing, atmospheric ozone, variations of cloudiness, galactic rays, climate models.

1 Введение

Внеземные факторы могут влиять на земную климатическую систему (ЗКС) как за счёт развития радиационного возмущающего воздействия (РВВ, называемого также радиационным форсингом) из-за изменения солнечной постоянной S_0 , так и за счёт ряда косвенных механизмов, связанных с влиянием потока солнечной радиации на фотохимические процессы в атмосфере или с влиянием потока галактических частиц, интенсивность которого модулируется солнечным ветром, на климатообразующие процессы (рис. 1) (Benestad, 2006; Gray et al., 2010; Russian National Report ..., 2011; Climate Change, 2013; Solanki et al., 2013).

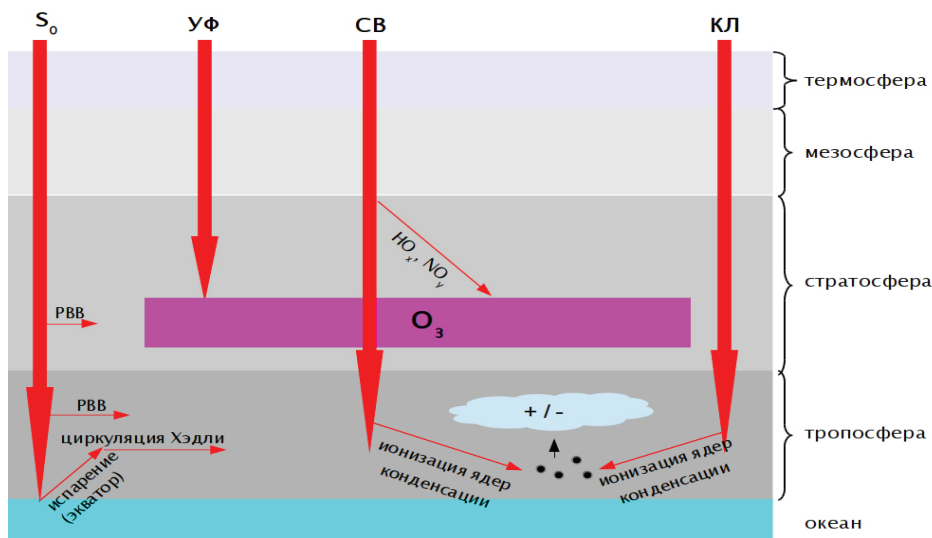


Рисунок 1 – Общая схема возможного влияния внеземных факторов на климат, предложенных к настоящему времени (без учёта факторов, связанных с изменениями параметров орбиты Земли). Толстыми красными стрелками показаны влияния вариаций солнечной постоянной (S_0), ультрафиолетовой части спектра излучения Солнца (УФ), потока высокоэнергетических частиц, образующихся при солнечных вспышках (СВ), и галактических космических лучей (КЛ). Тонкими красными стрелками представлена детализация этих воздействий через конкретные механизмы. РВВ – радиационное возмущающее воздействие.

В данной работе проводится обзор механизмов воздействия внеземных факторов на ЗКС без рассмотрения влияния изменений параметров земной орбиты, с которыми связано формирование ледниковых циклов.

2 Влияние солнечной активности на климат

2.1 Влияние вариаций полного потока солнечного излучения («солнечной постоянной») в исторический период

При изменении значения солнечной постоянной на δS_0 прямое глобальное РВВ равно $F_S = \frac{1}{4} \delta S_0 (1 - \alpha_p)$, где α_p – планетарное альbedo Земли, значение которого близко к 0,3. По оценке Пятого оценочного отчёта Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC AR5) (Climate Change, 2013, с. 696) величина РВВ за период 1750-2011 гг. равна $0,05 \pm 0,05$ Вт м². Это значительно меньше полного (включая антропогенное воздействие) РВВ ($2,3$ Вт/м² с интервалом неопределённости от $1,1$ Вт м⁻² до $3,3$ Вт м⁻²).

В IPCC AR5 в качестве момента времени, относительно которого вычисляется РВВ, выбран 1750г. Середина XVIII века, однако, характеризовалась относительно высоким уровнем солнечной активности. Если F_S вычислять относительно начала или конца этого столетия, то его значение увеличится. Однако, вывод о малом вкладе радиационного возмущающего воздействия из-за изменения солнечной постоянной в полное РВВ в целом остаётся справедливым. Например, F_S в 2011г. относительно начала XVIII века или его конца составит около $0,2$ Вт м⁻².

Согласно (Tung et al., 2008) чувствительность DT_g/DS_0 глобально – осреднённой температуры атмосферы у поверхности T_g к изменению S_0 в 11-летнем цикле оценивается в интервале $0,12-0,17$ К м² Вт⁻¹, что для РВВ соответствует $0,02-0,03$ К м² Вт⁻¹. При условии справедливости этой оценки на междесятилетних и вековых масштабах вклад изменения солнечной постоянной в потепление климата за индустриальный период не превышает $0,1$ К, т.е. не более 15% даже от линейного тренда T_g в XX веке. Это согласуется также с эмпирическими оценками (Lean, Rind, 2008; Benestad, Schmidt, 2009) и с модельными результатами (Мохов и др., 2006). При этом в (Lean, Rind, 2008) было отмечено, что вклад изменений солнечной постоянной в климатические изменения для второй половины XX века оказывается ещё меньше – $0,02 \pm 0,01$ К/столетие. Кроме того, учёт временного совпадения эруптивных вулканических извержений в XX веке с минимумами солнечной активности в 11-летнем цикле (Rypdal, 2012) должен приводить к завышенным оценкам температурной чувствительности к вариациям солнечной постоянной в (Tung et al., 2008). В (Мохов и др., 2012) на основе статистической модели оценено влияние внешних факторов различной природы (включая изменение солнечной постоянной) на вариации T_g в XX веке. При этом связь изменений T_g с изменениями S_0 на междесятилетнем и вековом временных масштабах оценена как статистически незначимая.

Минимумы солнечной постоянной с длительностью в несколько десятилетий или около одного столетия (минимум Вольфа, 1280-1350 гг; минимум Шпёфера, 1450-1550 гг; минимум Маундера, 1645-1715 гг; минимум Дальтона, 1790-1820 гг.) рассматриваются в качестве одной из возможных причин периода длительного похолодания середины второго тысячелетия нашей эры – малого ледникового периода (Eddy, 1976). Однако существенная неопределённость как соответствующего изменения S_0 в эти периоды, так и неопределённость данных реконструкций климата этой эпохи не позволяет с уверенностью сделать такой вывод об определяющей роли изменений S_0 в развитии малого ледникового периода (Climate Change, 2013).

В (Cubasch et al., 1997) был предложен механизм влияния солнечной активности на изменчивость климата в тропической области, связанный с усилением испарения из-за большего притока солнечной радиации к поверхности в период солнечных максимумов и соответствующим усилением циркуляции Хэдли и Уокера. Этот механизм проявляется в ряде численных расчётов с глобальными климатическими моделями. Но он не может полностью объяснить наблюдаемую 11-летнюю изменчивость в тропиках. В частности, аномалии температуры тропосферы между годами минимума S_{\min} и максимума S_{\max} солнечного цикла и соответствуют аномалиям притока тепла к тропосфере от океана около $0,5 \text{ Вт/м}^2$ (White et al., 2003). Это более чем в три раза превосходит соответствующую аномалию притока солнечной радиации к поверхности (около $0,15 \text{ Вт/м}^2$). В формировании отмеченных температурных аномалий возможно влияние стратосферы. Физической причиной такого влияния может быть, например, «принцип нисходящей регуляции» «downward control principle». Согласно (Haunyes et al., 1991) циркуляционные и термические характеристики на данной высоте в атмосфере в стационарном случае полностью определяются волновым форсингом на вышележащих уровнях. В свою очередь, такой форсинг в стратосфере может модулироваться солнечной активностью (см. ниже). С указанной модуляцией может быть также связано смещение регионов преобладающей активности атмосферного блокирования и характеристик блокирующих антициклонов в атмосфере в 11-летнем цикле (Barriopedro et al., 2008).

2.2 Влияние возможных изменений солнечной постоянной в ближайшие столетия

В большинстве расчётов с климатическими моделями для XXI столетия междесятилетние изменения солнечной активности не учитываются (за исключением 11-летнего солнечного цикла, рассчитанного как среднее для последних нескольких солнечных циклов, см., напр., (Climate Change, 2013)). Первые оценки влияния изменений S_0 на изменения климата в XXI веке с использованием глобальной климатической модели были получены в (Мохов и др., 2008). Сценарии изменения солнечной постоянной при этом были построены с помощью авторегрессионных моделей и, вме-

сте со сценариями антропогенного воздействия SRES (Special Report on Emission Scenarios), были использованы для задания внешнего воздействия на климат в расчётах с климатической моделью (КМ) ИФА РАН. При этом было получено, что вклад изменения солнечной постоянной в изменение T_g , а также в изменение температуры различных регионов в этом столетии очень мал относительно вклада антропогенных воздействий. В (Mokhov et al., 2012) эти результаты были распространены на сценарии внешнего воздействия RCP (Representative Concentration Pathways), охватывающих XXI-XXIII века. Качественно результаты (Mokhov et al., 2012) согласуются с результатами (Мохов и др., 2008). Согласно результатам модельных расчётов, несмотря на широкий диапазон сценариев изменения солнечной постоянной в XXI-XXIII веках (рис. 2), изменения приповерхностной температуры в эти столетия определяются, в основном, антропогенными воздействиями на ЗКС. Это справедливо даже для сценария RCP 2.6, в котором антропогенная нагрузка на климат является наименьшей среди анализировавшихся сценариев RCP (рис. 3). Ещё меньше относительный вклад изменения S_0 в XXI-XXIII веках при сценариях с большей антропогенной нагрузкой на климат (RCP 4.5, 6.0 и 8.5). Подобный результат, но при использовании другого сценария изменения S_0 (наступление в XXI веке минимума солнечной активности подобного минимуму Маундера) был также получен в (Feulner, Rahmstorf, 2010).

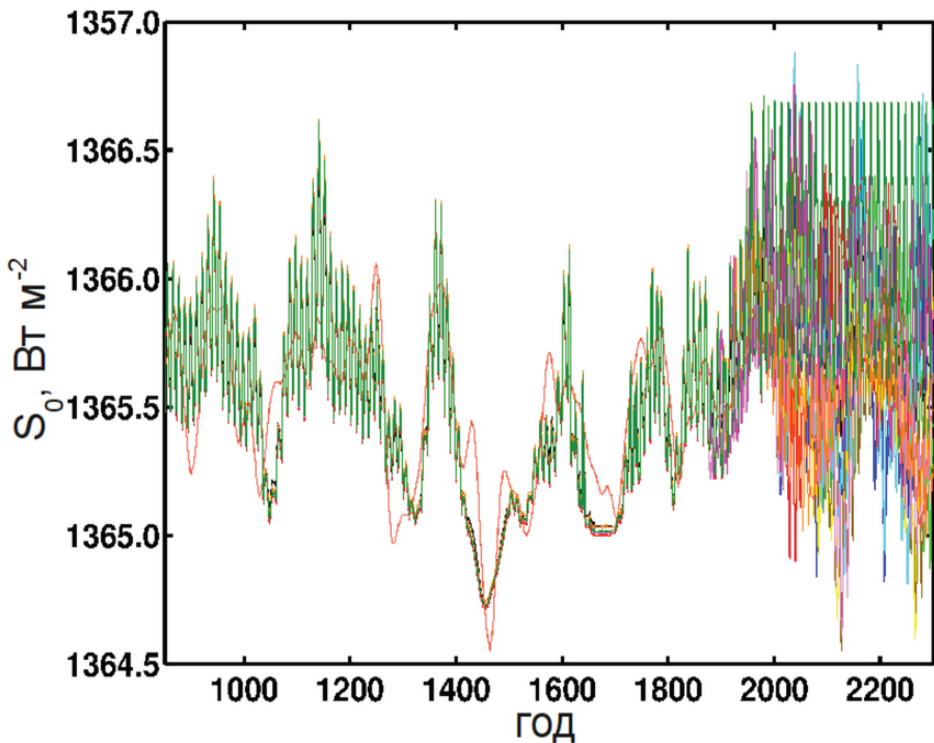


Рисунок 2 – Ансамбль сценариев изменений потока солнечной энергии на верхней границе атмосферы, использованных в (Mokhov et al., 2012).

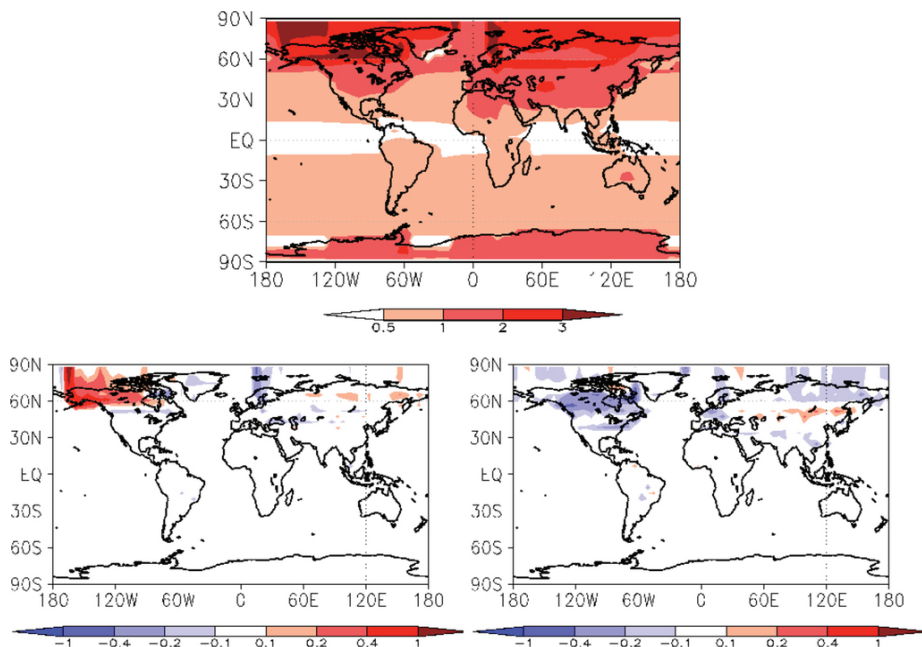


Рисунок 3 – Оценки влияния изменений потока солнечной энергии на верхней границе атмосферы на результаты расчётов с КМ ИФА РАН при сценарии RCP 2.6 (Mokhov et al., 2012): изменение температуры атмосферы у поверхности в 2090-2100гг. относительно 1990-2000гг., при осреднении по всем сценариям изменения солнечной постоянной S_0 (верхний рисунок), и отклонения этих изменений от варианта 1 для двух сценариев изменения S_0 с наибольшими положительными и наибольшими отрицательными отклонениями температуры (нижние левый и правый рисунок соответственно).

2.3 Изменение состояния стратосферы в 11-летнем солнечном цикле

В стратосфере в годы S_{\max} относительно годов S_{\min} по данным реанализа ERA-40 отмечается увеличение температуры тропиков, с максимальными аномалиями около 1-2 К в нижней и верхней стратосфере, а также увеличение температуры на несколько градусов в нижней части верхней стратосферы субполярных и полярных широт (Gray et al., 2010). Подобная структура отклика температуры выявляется и по спутниковым данным TOVS, но с примерно вдвое меньшими максимальными аномалиями (Gray et al., 2010). Эти изменения температуры существенно отличаются от соответствующих изменений в стратосфере при увеличении содержания в атмосфере хорошо перемешанных парниковых газов с охлаждением во всех широтных зонах. Это, в принципе, допускает выделение парникового и солнечного сигналов в наблюдаемых изменениях температуры стратосферы. При этом, однако, следует иметь в виду нестационарность отклика температуры стратосферы на 11-летний цикл по сравнению с соответствующим равновесным (установившимся) откликом на изменение солнечной постоянной.

С изменениями температуры в 11-летнем цикле связаны изменения поля ветра и, следовательно, изменения характеристик распространения стационарных планетарных волн из тропосферы в стратосферу (Kodera, 1995; van Loon, Labitzke, 2000). В целом, в годы S_{\max} зимний полярный вихрь и циркуляция Брюэра-Добсона ослабевают, полярная стратосфера холоднее обычной, тропическая – теплее обычной. Это приводит к росту содержания озона в стратосфере тропиков и, в результате, к дополнительному нагреву стратосферы. В годы солнечного минимума ситуация меняется на обратную. Такая связь содержания озона в стратосфере с солнечной активностью служит положительной обратной связью для отклика стратосферы на 11-летний солнечный цикл.

Отмечалось влияние солнечной активности в 11-летнем цикле на фазовые особенности квазидвухлетней цикличности (КДЦ) ветра в приэкваториальной нижней стратосфере (Безверхний, Груздев, 2007). В связи с этим следует иметь в виду, что КДЦ также может модулировать поле ветра в нижней стратосфере (van Loon, Labitzke, 2000; Labitzke, 2006). Изменение поля ветра в нижней стратосфере, в свою очередь, модулирует характеристики распространения волн из тропосферы в стратосферу. Эти эффекты могут приводить к различию интенсивности обмена между тропосферой и стратосферой в тропиках в солнечном цикле. В (Labitzke, 2006) отмечено, что в годы S_{\max} такой обмен и циркуляция Брюэра-Добсона ослабевают, если КДЦ в приэкваториальной нижней стратосфере находится в восточной фазе, а если в западной – усиливаются. Подобный отклик проявляется и в климатических моделях (Rind et al., 2008).

3 Косвенные механизмы влияния внеземных факторов на климат

3.1 Механизмы, связанные с откликом содержания озона в стратосфере на внеземные факторы

Из косвенных механизмов влияния солнечной активности на состояние ЗКС к настоящему времени в большей степени изучены механизмы, связанные с влиянием на содержание озона в атмосфере (особенно в стратосфере). В частности, оценено, что изменению S_0 в 11-летнем цикле на 0,07% соответствует изменение потока ультрафиолетовой радиации на несколько процентов. Это способно заметно интенсифицировать фотохимические процессы озонного цикла. Так, по спутниковым данным SAGE II для 1985-2003 гг. и по данным наземных измерений в годы S_{\max} относительно годов S_{\min} отмечен статистически значимый рост содержания озона на 2-4% в верхней стратосфере тропиков, а также в нижней и средней стратосфере для большинства широт (Soukharev, Hood, 2006; Груздев, Брассер, 2007). При этом отклик проявляется и в регионах, где озон не находится в химическом равновесии, указывая на важность динамических механизмов его отклика (Груздев, Брассер, 2007).

В периоды интенсивных выбросов Солнцем высокоэнергетических частиц (протонных вспышек) отмечена заметная интенсификация формирования ряда соединений (HO_x и NO_y), разрушающих озон (Krivolutsky

et al., 2005; Jackman et al., 2006). По спутниковым данным влияние NO_x может приводить к уменьшению содержания озона в полярной верхней стратосфере на 50% в течение нескольких суток, а влияние NO_y – к уменьшению содержания озона в этом же регионе на 10% на несколько месяцев (Jackman et al., 2006). В области зимнего полярного вихря разрушающие озон примеси могут опускаться также в нижнюю стратосферу, приводя к разрушению озона. Статистически значимая корреляция содержания озона с геомагнитной активностью отмечается, в частности, весной в полярных широтах Южного полушария. Однако этот механизм ограничен областью зимнего полярного вихря над относительно небольшой площадью Земли в условиях малой инсоляции. В связи с этим, следует ожидать малого вклада этого механизма в общее климатическое РВВ.

В настоящее время в ряде атмосферных моделей учитывается химический цикл озона. В рамках проекта сравнения таких моделей (Austin et al., 2008) было получено, что при учёте прямого влияния изменения солнечного спектра в 11-летнем цикле и соответствующего влияния на фотохимические процессы в стратосфере, а также учёте этого влияния через соответствующие вариации температуры поверхности океана, модели в целом воспроизводят особенности изменения озона и температуры.

В модели SOCOL в настоящее время учитывается влияние интенсивности галактических лучей и потока высокоэнергетических частиц от Солнца на степень ионизации в атмосфере (Calisto et al., 2011). В целом такая модель воспроизводит уменьшение содержания озона в полярной стратосфере при солнечных вспышках, отмеченное выше.

В численных экспериментах с моделью общей циркуляции INMCM4 было получено, что учёт вариаций озона в стратосфере в 11-летнем солнечном цикле приводит к статистически значимому отклику приповерхностной температуры атмосферы и давления на уровне моря (Е.М. Володин, личное сообщение).

Следует отметить, что измерения (с 2003г.) прибором высокой точности SORCE/SIM привели к оценкам изменения спектра солнечного излучения в 11-летнем цикле, существенно отличающимся от принятых ранее (Haigh et al., 2010). Согласно модельным расчётам, отклик озона на такое изменение спектрального состава солнечного излучения при этом также принципиально изменяется. Однако существенные отличия последней части солнечного цикла 23 по сравнению с подобными периодами более ранних солнечных циклов не позволяют утверждать, насколько такое поведение спектрального излучения типично для других временных интервалов.

3.2 Механизмы, связанные с влиянием внеземных факторов на характеристики облачности

В (Веретененко, Пудовкин, 1996; Marsh, Svensmark, 2003; Жеребцов и др., 2008; Распопов, Веретененко, 2009) рассмотрены механизмы, связанные с влиянием внеземных факторов на климат за счёт изменения характеристик облачности. В частности, в (Marsh, Svensmark, 2003) (см.

также ссылки в этой работе) с использованием спутниковых данных ISCCP D2 для облачности отмечалась высокая корреляция количества нижних облаков и их температуры с интенсивностью потока космических лучей, преимущественно в тропиках и средних широтах. При этом было предположено, что такое влияние связано с ионизацией нижней тропосферы за счёт потока галактических частиц. Образующиеся таким образом ионы могут двигаться в электромагнитном поле Земли и служить дополнительными ядрами конденсации для облачных капель и кристаллов. Подобное проявлялось в лабораторном эксперименте CLOUD, проведённом в CERN (Kirkby et al., 2011). Дополнительное влияние на накопление аэрозольных ионов вблизи верхней и нижней границы облаков может быть связано с вымыванием аэрозолей осадками (Carslaw et al., 2002). При этом меняются такие характеристики облаков, как их количество, альbedo и водность. Однако в (Sun, Bradley, 2002) отмечалось, что для исходных данных ISCCP D2 такая корреляция проявляется только для солнечного цикла 22 и становится незначимой для солнечного цикла 23 (см. также (Laken et al., 2012)). Последнее, в частности, может быть связано с влиянием вулканических извержений на содержание серной кислоты в стратосфере, увеличивающих её эффективное электрическое сопротивление (Tinsley, 2000). В целом содержание H_2SO_4 в стратосфере было существенно выше в период солнечного цикла 22, чем в период солнечного цикла 23. Следует также отметить, что в (Marsh, Svensmark, 2003) отмечалась лишь корреляция солнечной активности с облаками нижнего яруса. Количество таких облаков, перекрываемых более высокими облаками, не может быть достоверно установлено по спутниковым данным, в том числе по данным ISCCP D2, использованным (Marsh, Svensmark, 2003).

В (Kazil et al., 2006) с использованием численной атмосферной модели CCSM3, дополненной схемой PLOTINUS для расчёта потока вторичных частиц, образующихся при солнечных вспышках, сделана оценка климатической эффективности механизма, предложенного в (Marsh, Svensmark, 2003). Надо отметить, что расчёты проводились при ряде упрощающих предположений, приводящих к завышению эффективности такого механизма. Однако даже в этом случае увеличение концентрации частиц с размерами, достаточными для того, чтобы служить ядрами конденсации (мода Айткена и более крупные) в нижней тропосфере тропиков в годы S_{max} относительно годов S_{min} не превышает 1 см^{-3} . Это существенно меньше типичной фоновой концентрации таких ядер $10^3\text{-}10^4 \text{ см}^{-3}$ (Kondratyev et al., 2006). Более значимые увеличения концентрации ядер конденсации были получены для нижней тропосферы средних широт (до $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$). Однако сильное насыщение эффекта интенсификации формирования облачных капель при росте концентрации ядер конденсации приводит к тому, что увеличение концентрации облачных капель в годы S_{max} относительно годов S_{min} составляет не более 28%, так что развивающееся РВВ не превышает по абсолютной величине $0,24 \text{ Вт м}^{-2}$. Эта величина намного меньше оценок изменения полного РВВ для современного пери-

ода относительно доиндустриального. Кроме того, временной масштаб этого воздействия (около десятилетия) короток относительно временного масштаба действия других радиационных воздействий (несколько десятилетий или столетия). Учёт инерционности климата дополнительно уменьшает климатический отклик на это РВВ по сравнению с антропогенными воздействиями на ЗКС. Как следствие, механизмы, связанные с ионизацией тропосферы галактическими лучами и потоками солнечных частиц, вряд ли способны давать значимый вклад в изменения климата.

В (Веретененко, Пудовкин, 1995; Распопов, Веретененко, 2009) по данным стационарных наблюдений отмечалось уменьшение облачности над сушей севернее, примерно, 60°N через сутки после Форбуш-понижений потока галактических лучей (резкого уменьшения интенсивности этого потока, примерно, в течение суток с восстановлением к обычным значениям, примерно, за неделю). Через сутки-двое после протонных солнечных вспышек отмечалось увеличение количества облаков в этих регионах. Однако анализ характеристик облачности и значения планетарного альбедо (тесно связанного с характеристиками облачности) по спутниковым данным MISR не выявил соответствующих статистически значимых связей (Krissansen-Totton, Davies, 2013).

В (Жеребцов и др., 2008) рассмотрен механизм влияния солнечной активности на состояние климата, связанный с увеличением количества облаков в полярных областях зимой в периоды повышенной солнечной активности. Изменение климатического состояния при этом обусловлено преимущественно влиянием количества облаков на перенос тепловой радиации в тропосфере. Этот механизм согласуется с тем, что модуляция электрической проводимости солнечными вспышками наиболее значима именно в полярных областях (Tinsley, 2000). Согласно модельным оценкам, состояние приполярной атмосферы может меняться на синоптических временах из-за влияния этого механизма, но на временных масштабах от нескольких месяцев его влияние мало (Фоменко, Курбацкая, 2006).

Заключение

В настоящее время механизмы влияния внеземных факторов на ЗКС связываются с:

- прямым РВВ за счёт изменения солнечной постоянной;
- с воздействием на содержание озона в атмосфере изменения спектрального состава солнечного излучения и интенсивности потока галактических частиц.

Эти механизмы или уже учитываются в расчётах с климатическими моделями, или их учёт можно ожидать в ближайшем будущем. Что касается предложенных механизмов, связанных с воздействием внеземных факторов на характеристики облачности, то они требуют более детальной эмпирической и модельной аргументации.

Часть представленных результатов была получена при поддержке грантов Правительства РФ (соглашение 14.Z50.31.0033 с ИПФ РАН), Российского фонда фундаментальных исследований и Программ РАН.

Литература

Безверхний В.А., Груздев А.Н. 2007. О связи квазидесятилетних и квазидвухлетних колебаний солнечной активности и экваториального стратосферного ветра. ДАН, т. 415, №6, с. 809-813.

Веретененко С.В., Пудовкин М.И. 1996. Вариации общей облачности в ходе всплесков солнечных космических лучей. Геомагнетизм и аэрономия, т. 36, №1, с. 153-156.

Груздев А.Н., Брассер Г.П. 2007. Воздействие 11-летнего цикла солнечной активности на характеристики годового хода общего содержания озона. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, т. 43, №3, с. 379-391.

Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А., Васильева Л.А. 2008. Влияние гелиогеофизических возмущений на термобарические и климатические характеристики тропосферы Земли. Космические исследования, т. 46, №4, с. 368-377.

Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. 2006. Модельные оценки глобальных климатических изменений в XXI веке с учетом различных сценариев вариаций солнечной активности. ДАН, т. 411, №2, с. 250-253

Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. 2008. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке при различных сценариях солнечной и вулканической активности и антропогенных воздействий. Космические исследования, т. 46, №4, с. 363-367.

Мохов И.И., Смирнов Д.А., Карпенко А.А. 2012. Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений. ДАН, т. 443, №2, с. 225-231.

Распопов О.М., Веретененко С.В. 2009. Солнечная активность и космические лучи: влияние на облачность и процессы в нижней атмосфере (памяти и к 75-летию М.И. Пудовкина). Геомагнетизм и аэрономия, т. 49, №2, с. 147-155.

Фоменко А.А., Курбацкая Л.И. 2006. Влияние солнечной активности на термический режим высоких широт Северного полушария. Вычислительные технологии, т. 11, № S7, с. 96-103

Austin J., Tourpali K., Rozanov E., Akiyoshi H., Bekki S., Bodeker G., Brühl C., Butchart N., Chipperfield M., Deushi M., Fomichev V.I., Giorgetta M.A., Gray L., Kodera K., Lott F., Manzini E., Marsh D., Matthes K., Nagashima T., Shibata K., Stolarski R.S., Struthers H., Tian W. 2008. Coupled chemistry climate model simulations of the solar cycle in ozone and temperature. J. Geophys. Res., v. 113, № D11, D11306.

Barriopedro D., Garcia-Herrera R., Huth R. 2008. Solar modulation of

Northern Hemisphere winter blocking. *J. Geophys. Res.*, v. 113, № D14, D14118.

Benestad R.E. 2006. *Solar Activity and Earth's Climate*. N.Y.: Springer, 331 pp.

Benestad R.E., Schmidt G.A. 2009. Solar trends and global warming. *J. Geophys. Res.*, v. 114, № D14, D14101.

Calisto M., Usoskin I., Rozanov E., Peter T. 2011. Influence of Galactic Cosmic Rays on atmospheric composition and dynamics. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 11, №9, pp. 4547-4556.

Carslaw K.S., Harrison R.G., Kirkby J. 2002. Cosmics rays, clouds, and climate. *Science*, v. 298, №5599, pp. 1732-1737.

Climate Change 2013. *The Physical Science Basis* (Stocker T., Qin D., Plattner G.-K., et al., eds.). Cambridge/New York: Cambridge University Press. 2013. 1535 p.

Cubasch U., Voss R., Hegerl G.C., Waszkewitz J., Crowley T.C. 1997. Simulation with an O³AGCM of the influence of variations of the solar constant on the global climate. *Clim. Dyn.*, v. 13, №11 pp. 757-767.

Eddy J.A. 1976. The Maunder minimum. *Science*, v. 192, №4245, pp. 1189-1202.

Feulner G., Rahmstorf S. 2010. On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth. *Geophys. Res. Lett.*, v. 37, №5, L05707.

Gray L.J., Beer J., Geller M., Haigh J.D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G.A., Shindell D., van Geel B., White W. 2010. Solar influences on climate. *Rev. Geophys.*, v. 48, № 4, RG4001.

Haigh J.D., Winning A.R., Toumi R., Harder J.W. 2010. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, v. 467, № 7316, pp. 696-699.

Haynes P.H., McIntyre M.E., Shepherd T.G., Marks C.J., Shine K.P. 1991. On the "downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces. *J. Atmos. Sci.*, v. 48, № 4, pp. 651-678.

Jackman C.H., Deland M.T., Labow G.J., Fleming E.L., López-Puertas M. 2006. Satellite measurements of middle atmospheric impacts by solar proton events in solar cycle 23. *Space Sci. Rev.*, v. 125, № 1-4, pp. 381-391.

Kirkby J., Curtius J., Almeida J., Dunne E., Duplissy J., Ehrhart S., Franchin A., Gagne S., Ickes L., Kurten A., Kupc A., Metzger A., Riccobono F., Rondo L., Schobesberger S., Tsagkogeorgas G., Wimmer D., Amorim A., Bianchi F., Breitenlechner M., David A., Dom-

men J., Downard A., Ehn M., Flagan R.C., Haider S., Hansel A., Hauser D., Jud W., Junninen H., Kreissl F., Kvashin A., Laaksonen A., Lehtipalo K., Lima J., Lovejoy E.R., Makhmutov V., Mathot S., Mikkilä J., Minginette P., Mogo S., Nieminen T., Onnela A., Pereira P., Petaja T., Schnitzhofer R., Seinfeld J.H., Sipilä M., Stozhkov Y., Stratmann F., Tome A., Vanhanen J., Viisanen Y., Vrtala A., Wagner P.E., Walther H., Weingartner E., Wex H., Winkler P.M., Carslaw K.S., Worsnop D.R., Baltensperger U., Kulmala M. 2011. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. *Nature*, v. 476, № 7361, pp. 429-433

Kazil J., Lovejoy E.R., Barth M.C., O'Brien K. 2006. Aerosol nucleation over oceans and the role of galactic cosmic rays. *Atmos. Chem. Phys.*, v.6, №12, pp. 4905-4924.

Kodera K. 1995. On the origin and nature of interannual variability of winter stratospheric circulation in the northern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, v.100, №D7, pp. 14077-14087.

Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. 2006. *Atmospheric aerosol properties: Formation, processes and impacts*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 572 pp.

Krissansen-Totton J., Davies R. 2013. Investigation of cosmic ray-cloud connections using MISR. *Geophys. Res. Lett.*, v. 40, №19, pp. 5240-5245.

Krivolutsky A., Kuminov A., Vyushkova T. 2005. Ionization of the atmosphere caused by solar protons and its influence on ozonosphere of the Earth during 1994-2003. *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.*, v. 67, №1-2, pp. 105-117.

Labitzke K. 2006. Solar variation and stratospheric response. *Space Sci. Rev.*, v. 125, №1-4, pp. 247-260.

Laken B.A., Pallé E., Čalogović J., Dunne E.M. 2012. A cosmic ray-climate link and cloud observations. *J. Space. Wea. Space. Clim.*, v. 2, №26, A18.

Lean J.L., Rind D.H. 2008. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys. Res. Lett.*, v. 35, №18, L18701.

Marsh N., Svensmark H. 2003. Galactic cosmic ray and El Niño-Southern Oscillation trends in International Satellite Cloud Climatology Project D2 low-cloud properties. *J. Geophys. Res.*, v. 108, №D6, 4195 p.

Mokhov I.I., Bezverkhny V.A., Eliseev A.V., Nikitina N.G. 2012. Impact of statistically extrapolated changes in total solar irradiance on results of 21st-23rd projections with a global climate model under RCP scenarios. В сборнике 3rd International Conference on Earth System Modelling, Hamburg: Copernicus Gesellschaft, 3ICESM-63.

- Rind D., Lean J., Lerner J., Lonergan P., Leboissitier A. 2008. Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing. *J. Geophys. Res.*, v.113, №D24, D24103.
- Russian National Report. 2011. Meteorology and Atmospheric Sciences. 2007-2010 (Mokhov I.I., Krivolutsky A.A., eds.). Moscow: Maks Press, 216 p.
- Rypdal K. 2012. Global temperature response to radiative forcing: Solar cycle versus volcanic eruptions. *J. Geophys. Res.*, v.117, №D6, D06115.
- Solanki S.K., Krivova N.A., Haigh J.A. 2013. Solar irradiance variability and climate. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, v.51, pp. 311-351.
- Soukharev B.E., Hood L.L. 2006. Solar cycle variation of stratospheric ozone: Multiple regression analysis of long-term satellite data sets and comparisons with models. *J. Geophys. Res.*, v.111, №D20, D20314.
- Sun B., Bradley R.S. 2002. Solar influences on cosmic rays and cloud formation: A reassessment. *J. Geophys. Res.*, v.107, №D14, 4211 p.
- Tinsley B.A. 2000. 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, №1, pp. 231-258.
- Tung K.K., Zho J., Camp C.D. 2008. Constraining model transient climate response using independent observations of solar-cycle forcing and response. *Geophys. Res. Lett.*, v. 35, №17, L17707.
- van Loon H., Labitzke K. 2000. The influence of the 11-year solar cycle on the stratosphere below 30 km: A review. *Space Sci. Rev.*, v.94, №1, pp. 259-278.
- White W.B., Dettinger M.D., Cayan D.R. 2003. Sources of global warming in the upper ocean on decadal period scales. *J. Geophys. Res.*, v.108, № C8, 3248 p.