

ПРОБЛЕМЫ КЛИМАТА КАК ЗАДАЧА ОПТИКИ

© 2013 г. С. В. Авакян, доктор физ.-мат. наук, иностранный член НАН Республики Армения

ВНЦ Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

E-mail: avak2@mail.ru, avak@soi.spb.ru

Исследованы причины современных климатических изменений, полученные в ГОИ им. С. И. Вавилова за последние годы. Основные выводы относятся к соотношению вклада естественных (уровня солнечно-геомагнитной активности) и антропогенных источников воздействия на погоду и климат. Показано, что определяющими механизмами управления погодно-климатическими характеристиками являются процессы аэрокосмической физической оптики. Основной источник наблюдаемого в последние десятилетия глобального потепления – повышение активности Солнца на вековой шкале, главный канал воздействия солнечно-геомагнитных возмущений – управление конденсационно-кластерным механизмом зарождения облаков, наиболее сильный энергетический эффект – регулирование потоков теплового излучения подстилающей поверхности оптически тонкой облачностью. Вклад в глобальное потепление парникового эффекта на углеродсодержащих газах незначителен.

Ключевые слова: изменение климата, глобальное потепление, облакообразование, радиационный баланс Земли, оптически тонкая облачность, парниковый эффект, микроволновое излучение ионосферы, прогнозирование погодно-климатических характеристик.

Коды OCIS: 010.1290, 010.1300, 010.3920.

Поступила в редакцию 07.06.2013.

Введение

Целью данных исследований является использование достижений аэрокосмической физической оптики, развиваемой несколько десятков лет в ГОИ, в интересах климатологии и, прежде всего, для интерпретации результатов спутниковых наблюдений за глобальной распространенностью облачного покрова и вариациями радиационного баланса Земли, полученные в последние 20–30 лет. В этих целях учтены те базы данных [1–3] по солнечно-земной физике, которые ранее предназначались и реализовывались для моделирования воздействия факторов повышенной солнечно-геомагнитной активности на фо-

ноцелевую обстановку при работе в околоземном космическом пространстве ракетно-космической техники и при интерпретации наблюдений оптико-атмосферных явлений космонавтами. Основной эффект новизны развиваемого подхода к физике солнечно-атмосферных связей связан с опытом модельного исследования возмущений в ионосфере Земли при наиболее мощных естественных космофизических воздействиях (солнечных вспышках и магнитных бурях), который появился в ГОИ после введения нами в физику ионосферы и аэрономию трех элементарных процессов из физики атомных столкновений и оптики холодной плазмы: эффекта Оже, двукратной фотоионизации наружной электрон-

ной оболочки атома одним квантом и ридберговского возбуждения электронным ударом атомно-молекулярных ионосферных компонентов [4, 5]. Это позволило предложить нам не прямой энергетический канал солнечно-магнитосферных – погодно-климатических связей, который назван радиооптическим трехступенчатым триггерным механизмом [5–9].

Лаборатория аэрокосмической физической оптики ФГУП ВНЦ ГОИ в последние двадцать лет ведет пять направлений перспективных исследований в области окружающей среды:

- создание и подготовка к запуску в космос уникальной оптико-электронной спектрометрической аппаратуры “Космический солнечный патруль” для проведения впервые в мире постоянного мониторинга абсолютных потоков солнечного рентгеновского и крайнего УФ излучения и, одновременно, спектрального состава и абсолютных величин потоков электронов с энергиями от нескольких до 100 кэВ как захваченных, так и “высыпающихся” из радиационных поясов Земли в ионосферу (по проектам МНТЦ [10]),

- поиск причин и физических механизмов гелиогеофизических корреляций в биосфере, включая человека,

- разработка способа уменьшения в разы скорости наружной коррозии отечественных стальных трубопроводных систем (газонефтепроводов и трубопроводов) с учетом потоков электронов, высыпающихся из радиационных поясов в периоды геомагнитных бурь на средних и высоких широтах (патент РФ [11]),

- обнаружение влияния вековой активности Солнца на современное глобальное потепление и перспективы похолодания [12],

- поиск возможных путей искусственного управления погодно-климатическими характеристиками и учета “солнечного сигнала” в среднесрочных прогнозах.

Из названия статьи следует, что мы рассматриваем те аспекты климата, которые обусловлены в основном:

- оптикой ионосферной плазмы (с генерацией микроволнового излучения после возбуждения электронных – ридберговских состояний с достаточно большими главными квантовыми числами),

- оптикой конденсационно-кластерной дымки и облачного покрова на ее основе,

- оптическими параметрами радиационного баланса Земли.

Ранее все попытки учета вклада солнечно-космических факторов в качестве внешнего воздействия на погодно-климатическую систему сводились к рассмотрению вариаций полного потока лучистой энергии Солнца (солнечной постоянной) либо космических лучей. Но изменения и тех и других незначительны, а существенные изменения интенсивности космических лучей в тропосфере бывают достаточно редко. В этой ситуации нами предложен оригинальный физический механизм учета в проблеме “Солнце – погода, климат” мощных вариаций солнечного электромагнитного излучения в самой коротковолновой и самой изменчивой части спектра – крайнем ультрафиолетовом (КУФ) и мягком рентгеновском диапазонах. Наиболее значительны такие вариации во время вспышек на Солнце. Они часто сопровождаются возмущениями геомагнитной активности, связанной с корпускулярной активностью Солнца, при которых из радиационных поясов Земли в ионосферу вторгаются потоки электронов и протонов. Вспышки и геомагнитные бури преобладают не только по энергетике, но и по частоте повторяемости [7–9]. Отметим, что потоки солнечного ионизирующего излучения, как и потоки корпускул, высыпающихся из радиационных поясов, ниже высот 50–60 км не проходят, полностью поглощаясь ионосферой.

По связи гелиогеофизических факторов с погодно-климатическими явлениями, включая даже такие опасные как ураганы, имеется все больше экспериментальных доказательств [13]. Для целей нашей работы существенно то, что в качестве основной причины погодных изменений в нижней атмосфере учитывается конденсационный механизм [14, 15], в том числе, при важном вкладе в этот процесс микроволнового излучения, вызываемого повышенной активностью Солнца в виде вспышек и радиовсплесков.

Эти результаты позволили предложить оригинальный радиооптический трехступенчатый триггерный механизм (рис. 1) солнечно-магнитосферного управления погодно-климатическими явлениями [5–9].

В [16] были зарегистрированы спорадические возрастания интенсивности микроволнового излучения ионосферы в периоды солнечных вспышек и полярных сияний, т.е. во время геомагнитных бурь и суббурь. Природа такого сигнала (как излучения в дипольных перехо-

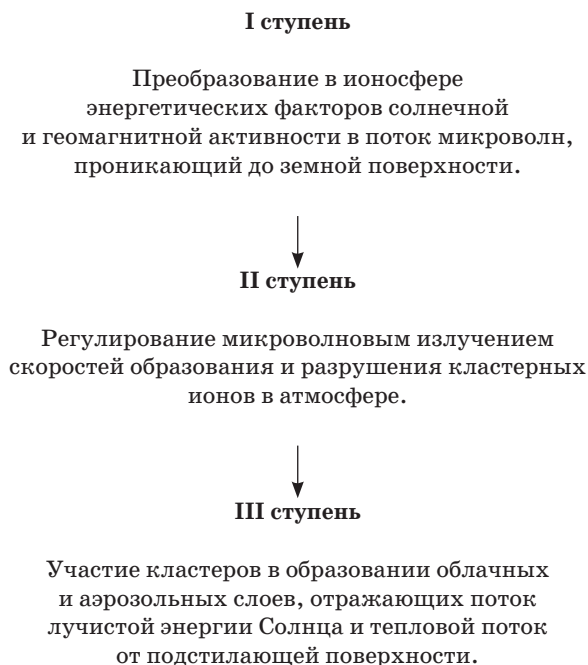


Рис. 1. Общая схема радиооптического трехступенчатого триггерного механизма воздействия факторов солнечно-геомагнитной активности на тропосферные характеристики.

дах между высоковозбужденными ридберговскими уровнями с главным квантовым числом $n \approx 10-20$ и с изменением орбитального квантового числа на единицу) раскрыта в наших работах середины 1990-х годов [17]. В 2002 г. важная роль этого “ридберговского” механизма генерации микроволн возмущенной ионосферой подтверждена впервые экспериментально на стенде “Сура” (при ионосферном поглощении радиоволн на частотах 4,7–6,8 МГц), когда была дана, полностью основанная на работе [17], физическая интерпретация наблюдаемого микроволнового излучения ионосферы на частоте 600 МГц [18]. Действительно, согласно работе [18] “анализ различных возможностей генерации обнаруженного излучения (рассеяние теплового излучения Земли на искусственных неоднородностях электронной концентрации, тормозное излучение электронов, ускоренных высокочастотной плазменной турбулентностью до энергий порядка 10–15 эВ, переход электронов между высокими ридберговскими уровнями молекул нейтральных компонент ионосферной плазмы, возбужденными при их столкновениях с ускоренными электронами) и проведенные оценки показали, что последний из трех перечисленных механизмов наиболее вероятен”.

Обнаруженные в [14, 15] воздействия как вспышек на Солнце, так и солнечных микроволновых радиовсплесков на содержание паров воды в столбе атмосферы в высокогорных наблюдениях (на высоте 2,1 км под Кисловодском) были интерпретированы авторами как результат включения конденсационно-кластерного механизма в этих случаях с образованием кластерных комплексов из паров воды. Это подтверждалось регистрацией увеличенного поглощения атмосферы в появляющихся и углубляющихся кластерных полосах поглощения в областях длин волн: 320–330, 360, 380–390, 410 и 480 нм.

В [19] в качестве основного процесса развала кластерных ионов в присутствии молекулярного газа при интерпретации данных лабораторных экспериментов с кластерами из паров воды и углекислого газа, в том числе и в области атмосферных плотностей, предложена “столкновительная диссоциативная рекомбинация”. Показано, что коэффициенты скорости диссоциации сильно зависят от величины орбитального момента (l) ридберговского уровня во время столкновения: вероятность диссоциации увеличивается для малых l и, наоборот, возрастает при больших значениях l . Следовательно, в периоды всплесков радиоизлучения Солнца и, тем более, в периоды спорадического роста интенсивности микроволнового ридберговского излучения ионосферы (во время солнечных КУФ и рентгеновских вспышек, а также геомагнитных бурь) будет происходить индуцированное поглощением усиленного потока микроволнового излучения заселение ридберговских уровней с более высокими l в процессе “столкновительной диссоциативной рекомбинации” и, как результат, – уменьшение вероятности диссоциации кластерных ионов нижней атмосферы. Исходя из этого, можно констатировать, что микроволновый поток способствует росту концентрации кластеров из паров воды в тропосфере, а это далее сопровождается образованием оптически тонкой облачности, или, изначально, конденсационной дымки. Эта облачность является в своем первоначальном виде средой, пропускающей более 90 % проходящего потока солнечного излучения. Но при этом она задерживает около половины уходящего в космос теплового излучения подстилающей поверхности [12]. Вот почему такая оптически тонкая облачность является разогревающей. Нами показано, что ее увеличенное образование после вспышек на Солнце и мировых магнитных бурь

(и в целом, в периоды повышенной солнечно-геомагнитной активности), согласно радиооптическому механизму, – основная причина современного глобального потепления, связанного с эпохой максимума вековых (квазистолетного и квазидвухсотлетнего) циклов гелиогеофизической активности [7–9].

Очевидно, что для подтверждения важности механизма солнечно-тропосферных связей необходимо объяснение наблюдаемой зависимости погодно-климатических эффектов от цикличности активности Солнца. Кроме 11-летнего цикла солнечной активности, внутри которого проявляется и в температуре и в осадках диапазон периодов от 2-х до 6-ти лет, существуют, как известно, более длительные циклы. Нами обосновано [7–9, 12, 20, 21] решающее влияние вековых циклов солнечно-геомагнитной активности на наблюдаемое в последние десятилетия глобальное повышение

температуры приземного воздуха (“глобальное потепление”). Это удалось сделать на основе концепции радиооптического трехступенчатого триггерного механизма. При этом были проанализированы, во-первых, тренды основных индексов солнечной и геомагнитной активностей, во-вторых, экспериментальные результаты о глобальном распределении облачного покрова, полученные со спутников, начиная с первой половины 1980-х годов. Оказалось, что все ключевые эффекты совокупного векового (квазистолетного и квазидвухсотлетнего) цикла солнечно-геомагнитной активности находят свое отражение в поведении глобальной облачности (рис. 2). Так максимум глобальной облачности в 1985–1987 гг. приходится на вековой максимум электромагнитной (1985) и корпускулярной (1987 г.) активности Солнца [22], а второй максимум (конец 2003 г.) совпадает с абсолютным максимумом геомагнитной активност-

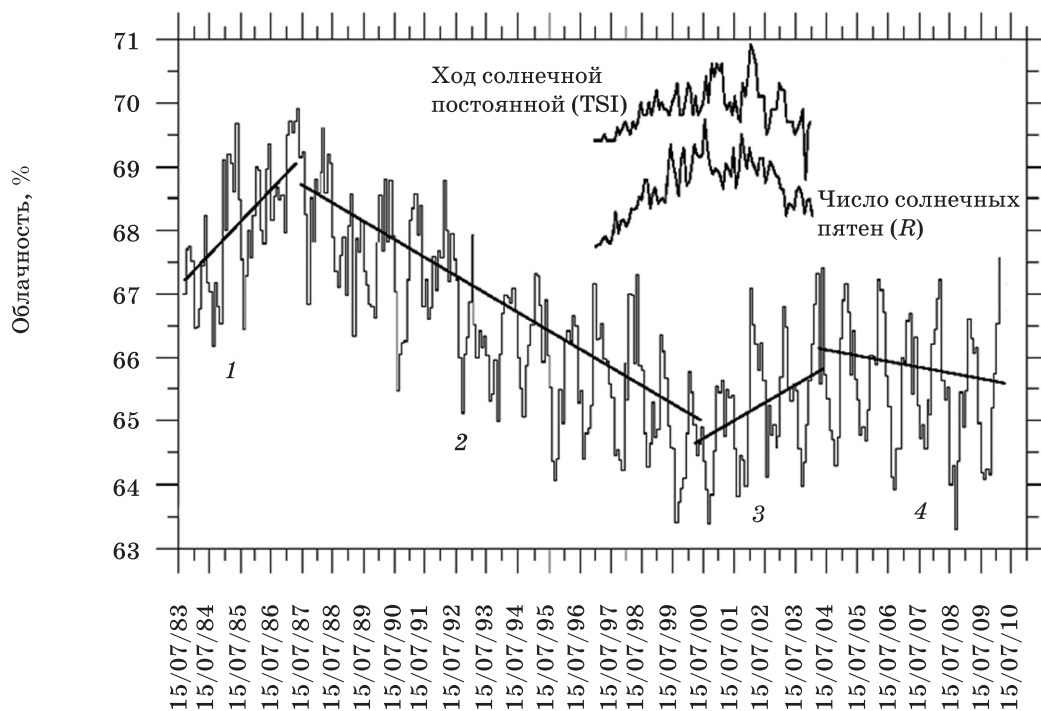


Рис. 2. Изменение площади глобальной полной облачности по наблюдениям со спутников по данным сайта [<http://isccp.giss.nasa.gov/climanal7.html>] (нижняя кривая с месячным усреднением). Средняя кривая – усредненное за месяц число солнечных пятен [12], верхняя кривая – текущий ход величины солнечной постоянной – (TSI) [23]. 1 – период с 1983 по 1985/7 годы, рост облачности в связи с увеличением коротковолновой активности Солнца и возрастанием геомагнитной активности; 2 – период с 1987 по 2000 годы, падение потока КУФ излучения Солнца и числа вспышек на Солнце; 3 – период с 2000 по 2003 годы, рост геомагнитной активности вплоть до конца 2003 года; 4 – период с 2004 года: общее падение числа мировых магнитных бурь и коротковолновой электромагнитной активности Солнца.

сти (по количеству геомагнитных бурь) за весь период наблюдений (более 100 лет). Рисунок 2 подтверждает, что уменьшение распространенности облачности в глобальном масштабе после 1987 и 2003 годов полностью соответствует, благодаря действию радиооптического механизма, снижению активности Солнца (по потоку в мягком рентгеновском и КУФ диапазонах с 1985 г.) и геомагнитно-буревой активности с 2004 г. (по потоку высыпавшихся из радиационных поясов электронов).

С 1985/86 гг., согласно [23], началось существенное возрастание потока длинноволновой радиации, уходящей в космос из атмосферы и с подстилающей поверхности. В рамках концепции радиооптического механизма это прямое свидетельство сокращения в основном как раз оптически тонкой облачности, которая хорошо задерживает тепловое излучение Земли, но пропускает почти свободно основной поток лучистой энергии Солнца.

В [23] представлены следующие данные по эволюции энергетики общего радиационного баланса Земли в 1985–2003 гг. За этот период рост величины уходящей длинноволновой радиации (УДР) составил около 15 Вт/м^2 , а величина уходящей коротковолновой радиации (УКР) уменьшилась примерно на 10 Вт/м^2 . Это согласуется с нашей оценкой воздействия радиооптического механизма. Действительно, уменьшение общей облачности с момента максимума солнечной активности в 1985/87 гг. по 2000 г. составил 4–5 % (рис. 2). При среднем альбедо облаков 0,5–0,8 и с учетом шарообразности Земли $342 \text{ Вт/м}^2 \times (0,04 - 0,05) \times (0,5 - 0,8) = 6,8 - 13,7 \text{ Вт/м}^2$. Это оценочная величина, на которую уменьшается значение потока уходящей коротковолновой радиации. В среднем она составляет 10 Вт/м^2 , что соответствует результатам анализа спутниковых данных, выполненных в [23].

Сравнительный количественный анализ энергетики антропогенных и природных факторов современного глобального изменения климата показывает, что природный компонент (солнечно-геомагнитная активность) более важен по вкладу в радиационный баланс, чем парниковый эффект на антропогенных углеродсодержащих газах. Действительно, величина потока уходящего в космос теплового излучения Земли увеличилась на 15 Вт/м^2 , что почти в 6 раз больше, чем чистый эффект от парниковых газов, определенный многолетней деятельностью Межправительственной груп-

пы экспертов по проблеме изменений климата ($2,63 \text{ Вт/м}^2$). Главное, что при этом до $7,0 \text{ Вт/м}^2$ дополнительно УДР образуется при переработке в тепло того добавочного коротковолнового излучения, которое (в количестве 10 Вт/м^2 [23]) стало проникать в нижнюю тропосферу после уменьшения площади глобальной облачности. Этот коэффициент трансформации солнечной радиации, поступающей на Землю (342 Вт/м^2) в полный поток УДР, уже увеличенный с конца 1980-х гг. до 240 Вт/м^2 , оценен из соотношения: $(240/342 = 0,7)$. Вклад в глобальные изменения климата вариаций величины солнечной постоянной (около 0,1 %, т.е. $0,3 \text{ Вт/м}^2$) очевидно несуществен на фоне как векового тренда солнечно-геомагнитной активности, так и нарастающего антропогенного влияния.

Корреляция вариаций солнечно-геомагнитной активности, прозрачности атмосферы и глобальной облачности

Остановимся на вкладе в современное изменение климата долговременных вариаций прозрачности нижних слоев атмосферы. По данным работы [24] наземный глобальный мониторинг солнечной радиации на земной поверхности показывает падение ее величины, в период с 1950-х по 1985 гг., а затем – рост с 2000 г. Это полностью соответствует концепции вклада векового хода солнечной активности в образование конденсационно-кластерной дымки в рамках радиооптического механизма.

Недавно в [25], после анализа данных, приведенных в [26] по альбедо Земли (рассчитанного по спутниковым измерениям распространенности глобального облачного покрова и измеренного по регистрации пепельного света Луны), и в [27] по вариациям величины потока солнечного излучения на земной поверхности, рассчитанной по тем же спутниковым наблюдениям, сделаны выводы:

1) рост величины потока солнечного излучения у земной поверхности составил 3 Вт/м^2 за период 1983–2001 гг. [27] и $6-7 \text{ Вт/м}^2$ за период с 1984 по 2003 гг. (согласно измерениям [26]);

2) такой рост, в соответствии с коэффициентом климатической чувствительности ИРСС, должен был привести к увеличению температуры приземного воздуха на $1,5-3,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (даже если в расчетах использовать только данные [27]), что намного выше чем наблюдаемый эффект современного глобального потепления.

Этот факт привел авторов [25] к выводу, что рост потепления, вызванного усилением солнечной радиации у земной поверхности в 1983–2001 гг., “компенсировался неизвестным пока экстраохлаждающим фактором”. Нами здесь впервые показано, что этим фактором является уменьшение площади оптически тонкой глобальной облачности из-за спада уровня солнечно-геомагнитной активности в вековом цикле и, соответственно, увеличением величины потока уходящей в космос тепловой радиации Земли.

Итак, во второй половине 20-го века величина прямой и рассеянной солнечной радиации изменялась в обратном направлении по отношению к общей облачности и к вековому тренду солнечной активности, совокупный максимум которого пришелся на 1985 г. (в электромагнитной активности) и на 1987 г. (в корпускулярной активности Солнца [22]). Поэтому мы имеем все основания связать все эффекты [24] увеличения (brightening) и уменьшения (dimming) величины солнечной радиации у земной поверхности в 20-м веке с вековыми (квазистолетними и квазидвухсотлетними) вариациями активности Солнца в рамках нашего радиооптического трехступенчатого триггерного механизма.

Веским подтверждением правильности подобного подхода являются данные спутникового эксперимента UW HIRAS, при котором зарегистрировано повышенное на 10–15 % содержание полной облачности в сравнении со всеми другими спутниковыми экспериментами за счет способности, в отличие от них [28], дополнительно фиксировать и “полупрозрачные” перистые облака.

Обнаруживаемое глобальное усиление солнечной радиации у земной поверхности согласуется с ростом прозрачности воздуха в измерениях по 342-м европейским станциям [29] с начала 1980-х годов, при этом авторы считают, что именно это обеспечило до 20 % наблюдаемого увеличения среднегодовой температуры в Европе (в Восточной Европе 50 %). Но при этом обнаружена определенная стабилизация величины прозрачности к 2000 г., а также пикообразное увеличение дней с низкой видимостью в период 1984–1988 гг., когда в осенне-зимний период, фактическая видимость была низкой в течение наибольшего числа дней (за весь период наблюдений с 1978 г.).

Основная причина роста нестабильности климата – антропогенное превращение “Зеленой” Земли в “Серую” вследствие прогрессиру-

ющей абиотизации суши [30]. Понятие “Серая Земля” означает, в частности, то, что лесов осталось менее половины, фитомасса суши уменьшилась из-за вмешательства человека на 41,5 % на середину 1970-х, а к началу XXI века пройден рубеж 50 %, и уже есть оценки, что к 2010 г. на суше остается 2/5 фитомассы по сравнению с природной. И если для Зеленой Земли на биологический круговорот шло 10 % радиационного баланса, то сейчас 4 %, т.е. вне биологического круговорота выделилось 6,3 Вт/м² (в сферу внешней ветви геологического круговорота). Именно дообогревание освоенной суши тепловым потоком мощностью 6,3 Вт/м², дополнительно переходящим из сферы биокруговорота во внешнюю ветвь геокруговорота, происходит всюду, где абиотизация снизила потенциал испарения.

Возможности учета активности Солнца в погодно-климатических прогнозах

Рассмотрим теперь возможности прогноза погодно-климатических явлений в свете нашей концепции солнечно-тропосферных связей. На временной шкале менее года выявляется корреляция в зависимости от распространенности полной и нижней облачности с пятенной и факельной активностью Солнца (т.е., соответственно, с числом солнечных пятен и величиной солнечной постоянной), рис. 2 (средняя кривая – усредненное за месяц число солнечных пятен, и верхняя кривая – текущий ход величины солнечной постоянной – Total Solar Irradiance – TSI [23]). Тогда следует констатировать, что по количеству пятен и факельным полям (всплески величины TSI связаны с факельным УФ излучением атмосферы Солнца) можно прогнозировать изменение площади облачного покрова, а следовательно, и тепло-радиационный баланс Земли с заблаговременностью в несколько месяцев (исходя из известной статистики времени жизни этих образований в фотосфере Солнца). Соответствующий способ среднесрочного (от 1–2 недель до 1–3 месяцев) прогноза погодно-климатических характеристик сводится к определению характера изменения площади (распространенности) облачного покрова, что приводит к количественно статистически обоснованным аномалиям в температурах приземного воздуха на больших территориях, согласно сведениям, имеющимся в банке данных по температурным аномалиям, созданным ГУ ВНИИ Гидрометеорологиче-

ской информации – Мировым центром данных по совокупности измерений всеми метеорологическими станциями Российской Федерации с 1966 г. по пятидневам каждого года.

Выводы

Результаты проведенных исследований показывают, что

– главный канал влияния солнечно-геомагнитной активности на климат и погоду – управление глобальной распространенностью оптически тонкой облачности. Это дает от 7 Вт/м² в радиационном балансе Земли на этапе современного глобального потепления;

– вклад “солнечного сигнала – факторов повышенной солнечно-геомагнитной активности” в глобальное потепление конца XX – начала

XXI-веков – превалирует, а парниковый эффект на антропогенных газах с вкладом в 2,63 Вт/м² (по оценке Межправительственной группы экспертов по проблеме изменений климата) играет при этом второстепенную роль;

– основной фактор существующего антропогенного влияния на повышение температуры приземного воздуха – лесосведение и абиотизация суши с вкладом до 6,3 Вт/м².

– вклад в глобальные изменения климата вариаций величины солнечной постоянной (около 0,1 %, т.е. порядка 0,3 Вт/м² с учетом шарообразности Земли) несуществен.

Выражаю благодарность за полезные консультации по физическому механизму столкновительной диссоциативной рекомбинации профессору Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета А.З. Девдариани.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф. Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве. Справочник. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 501 с.
2. Avakyan S.V., Il'in R.N., Lavrov V.M., Ogurtsov G.N. Collision Processes and Excitation of the Ultraviolet Emission from Planetary Atmospheric Gases. Handbook of Cross Sections/ Ed. S.V. Avakyan. London, Gordon and Breach Publ. 1998, 354 p.
3. Авакян С.В., Ильин Р.Н., Лаеров В.М., Огурцов Г.Н. Сечения процессов ионизации и возбуждения УФ излучения при столкновениях электронов, ионов и фотонов с атомами и молекулами атмосферных газов. Справочник. СПб.: ГОИ им. С.И. Вавилова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2000. 365 с.
4. Авакян С.В. Роль процессов высокой пороговой энергии в физике верхних атмосфер планет // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 8. С. 33–40.
5. Авакян С.В. Физика солнечно-земных связей: результаты, проблемы и новые подходы // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 4. С. 1–8.
6. Авакян С.В., Воронин Н.А. Возможные механизмы влияния гелиогеофизической активности на биосферу и погоду // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 4. С. 78–83.
7. Авакян С.В., Воронин Н.А. Роль космических и ионосферных возмущений в глобальных климатических изменениях и коррозии трубопроводов // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 14–29.
8. Avakyan S.V., Voronin N.A. The role of space and ionospheric disturbances in the global climate change and pipeline corrosion // Izvestija, Atmospheric and Oceanic Physics. Springer. 2011. V. 47. № 9. P.1143–1158.
9. Авакян С.В. Проблемы климата как задача солнечно-земной физики // Доклад, зачитанный на первом пленарном заседании Всероссийской конференции “Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений”. Иркутск, Институт солнечно-земной физики СО РАН, 19 июня 2012 г. Сборник научных трудов “Солнечно-земная физика”. 2012. Вып. 21. С.18–27.
10. Avakyan S.V., Andreev E.P., Afanas'ev I.M., Leonov N.B., Savushkin A.V., Serova A.E., Voronin N.A. Creating of the permanent Space Patrol of ionizing solar radiation // Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics. Proc. SPIE. 2002. V. 4853. P. 600–611.
11. Авакян С.В., Воронин Н.А. Способ уменьшения скорости коррозии металла стальной трубы трубопроводного транспорта. Патент РФ № 2447425 // Официальный бюллетень ФСИС “Изобретения и полезные модели”. № 10. 2012.
12. Авакян С.В. Роль активности Солнца в глобальном потеплении // Вестник РАН. 2013. Т. 83. № 5. С. 425–436.