

СОЛНЕЧНО-
ЗЕМНЫЕ
СВЯЗИ,
ПОГОДА
И КЛИМАТ



ПОД
РЕДАКЦИЕЙ
Б. МАЧ-КОРМАНА
И Т. СЕЛИГИ



**Solar-Terrestrial
Influences on
Weather and Climate**

Proceedings of a Symposium/Workshop
held at the Fawcett Center for Tomorrow,
The Ohio State University, Columbus, Ohio, 24—28 August, 1978

Edited by
Billy M. McCormac
Lockheed Palo Alto Research Laboratory

Thomas A. Seliga
Atmospheric Sciences Program, The Ohio State University

D. Reidel Publishing Company
Dordrecht: Holland/Boston: U. S. A.
London : England

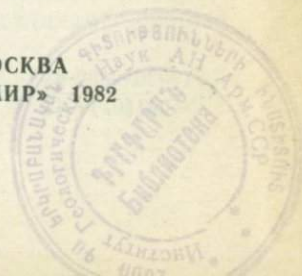
СОЛНЕЧНО-
ЗЕМНЫЕ
СВЯЗИ,
ПОГОДА
И КЛИМАТ

ПОД
РЕДАКЦИЕЙ
Б. МАК-НОРМАНА
И Т. СЕЛИГИ

Перевод
с английского
под редакцией
д-ра физ.-мат.
наук, проф.
Г. С. ИВАНОВА-
ХОЛОДНОГО

521551.50921.

МОСКВА
«МИР» 1982



4073

Авторы: Б. Мак-Кормак, Т. Селига, У. Робертс и др.
Солнечно-земные связи, погода и климат: Пер.
с англ./Под ред. Б. Мак-Кормака, Т. Селиги.— М.:
Мир, 1982, 384 с., ил.

Коллективная монография, посвященная международному симпозиуму по влиянию солнечной активности на погоду и климат. В работе симпозиума, проведенного в США, приняли участие также ученые из СССР, ФРГ и других стран. В ней отражен современный уровень исследований и намечены пути на будущее. Признание факта влияния солнечной активности на погоду и климат влечет за собой необходимость развивать разнообразные конкретные исследования, направленные на уточнение механизма этого влияния и в конечном счете на его учет в краткосрочных и долгосрочных прогнозах погоды.

Книга рассчитана на метеорологов, климатологов, аэрологов и специалистов по гелиогеофизике, интересующихся вопросами формирования погоды и климата с учетом факторов, связанных с солнечной активностью.

*Редакция литературы по космическим исследованиям,
астрономии и геофизике*

С $\frac{1903040000-98}{041(01)-82}$ 98-82, ч. 1

© Перевод на русский язык, «Мир», 1982
© 1979 by D. Reidel Publishing Company,
Dordrecht, Holland

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Проблема влияния солнечной активности на погоду и климат занимает умы людей начиная с прошлого столетия. В Советском Союзе в разное время был опубликован ряд монографий и сборников, посвященных этой проблеме, которая сначала представлялась простой, но в действительности оказалась достаточно сложной. Внимание к ней периодически то возрастает, то угасает.

Одной из первых книг, в которой активно поддерживалась идея влияния Солнца на тропосферу и анализировались соответствующие работы, была монография М. С. Эйгенсона и др. «Солнечная активность и ее земные проявления» (М.—Л.: Гостехиздат, 1948). Позже, в период резко критического отношения к проблеме появилась монография А. С. Монина «Прогноз погоды как задача физики» (М.: Наука, 1969). Однако важность влияния солнечной активности и других космических факторов на атмосферную циркуляцию была подчеркнута на I Всесоюзном совещании в 1972 г. в Москве (Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды.— Л.: Гидрометеиздат, 1974). Отдельные вопросы выносились на международные конференции. Таким образом, вновь возник интерес ко всей проблеме в целом.

Предлагаемый читателю перевод коллективной монографии — трудов симпозиума, посвященного именно этой теме, который состоялся в июле 1978 г. в США, — заслуживает внимания в ряде отношений. Начать с того, что проведение такого симпозиума под эгидой Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) с широким участием известных ученых различных специальностей свидетельствует о заметном расширении в США работ по этой теме. Важно отметить резкое изменение отношения к проблеме. Чем вызван такой поворот, какие получены новые результаты, как ставятся сегодня задачи исследования? Ознакомление с докладами, представленными на симпозиум, позволяет получить ответы на такие вопросы. В книге проблема получила всестороннее освещение, что представляет особый интерес для специалистов.

Путь решения проблемы влияния солнечной активности на погоду и климат лежит вдали от прямолинейных крайних

взглядов типа: все зависит от Солнца, ничего не зависит от Солнца. Наиболее сильным аргументом в пользу постановки и развития серьезных исследований послужил полученный в последнее время неожиданный результат, заключающийся в том, что в течение одного-двух дней после пересечения Землей секторной границы межпланетного магнитного поля (ММП) заметно ухудшается краткосрочный прогноз погоды. Пока не ясно, в чем причина этого эффекта. Однако предпринимаются попытки при составлении прогнозов погоды как-то учесть влияние ММП. Очевидно, что без понимания физического механизма грамотный учет эффекта затруднителен.

Ахиллесова пята в постановке исследований влияния на погоду и климат вариаций солнечной активности — не решенный до сих пор вопрос о физическом механизме такого влияния. Нельзя сказать, что на этот счет не предложено никаких гипотез, идей или соображений. Напротив, как видно из этой книги, их даже слишком много.

Поэтому сейчас все шире распространяется мнение, что в области исследования солнечно-атмосферных связей, как и в ряде других областей геофизики, проблема состоит не в том, что не предложено физических механизмов, а в том, что отсутствует база для оценки их применимости путем проведения численных и натурных экспериментов или путем статистического анализа данных. Сложность передачи возмущений от Солнца к нижней атмосфере и наличие одновременного влияния на атмосферу многообразных факторов ведут к тому, что проявление внешнего сигнала на фоне собственных мощных циркуляционных механизмов в системе океан—атмосфера трудно выявить. Тем более в этих условиях осложняется проверка предложенного механизма. В частности, при детальном рассмотрении выясняется, что современное состояние исследований вообще не позволяет выбрать наиболее подходящий механизм и обосновать его справедливость. Одна из трудностей связана с тем, что результаты анализа наблюдательных данных часто противоречивы. При достаточно строгом подходе оказывается, что ряд результатов, полученных ранее, вообще недостаточно обоснован и не является статистически значимым. Вот почему в ряде статей особое значение придается методическим вопросам, в частности вопросам правильного использования методов статистического анализа данных и непременно определению статистической значимости результатов. В настоящей книге этому важному вопросу уделено большое внимание, что выгодно отличает ее от многих других публикаций.

Действительно, за последние годы заметно возрос уровень методов статистического анализа данных, большой прогресс принесло использование ЭВМ. Это особенно важно, поскольку

основным инструментом изучения связей климата и погоды с солнечной активностью остается статистика. Многие прежние выводы, полученные на примитивном уровне поиска корреляций и периодичностей, особенно основанных на простом визуальном сопоставлении кривых на графиках, теперь полностью пересматриваются. Применение более совершенных статистических методов (главных компонент, спектрального анализа, множественных регрессий, метода максимума энтропии и т. п.) к совместному анализу достаточно длинных (и проверенных на репрезентативность) рядов данных о погоде или климате и о солнечной активности привело к существенному подъему культуры исследований, к уменьшению фактора субъективности выводов и количественной оценке значимости результатов.

Строгий анализ результатов, полученных до последнего времени, содержится в работе Питтока, в которой многим, даже признанным выводам вынесен суровый приговор; по мнению автора, статистически обоснованными являются, возможно, лишь выводы о корреляции погоды с изменениями солнечной активности за времена порядка дней. В других статьях это заключение оспаривается. Тем не менее очевидно, что ранее использованные методы анализа и материалы не всегда обеспечивали получение обоснованных результатов. Высказывается мнение, что необходима большая работа по улучшению методов измерения исследуемых величин, по усовершенствованию методов подбора материала и его анализа, с тем чтобы устранить противоречивость выводов и получить возможность перейти к построению однозначных физических механизмов явления.

Отметим некоторые новые факты, установленные при поисках связи погоды и климата с солнечной активностью и нашедшие отражение в трудах симпозиума, и рассмотрим в их свете положение с механизмами.

В прежних работах наиболее известным и ясным аргументом в пользу влияния солнечной активности на погоду, пожалуй, был факт изменения с солнечным циклом ширины годичных колец на срезах многих деревьев. Достоинство этих индикаторов состоит в том, что в отличие от данных о погоде или об урожаях и т. п. они обладают преимуществами объективности и стабильности, поскольку годовое усреднение производится самой природой в устойчивых условиях. Однако была замечена неоднозначность таких данных, поскольку эффект не всегда хорошо выражен или моменты максимума ширины колец для одних случаев приходится на минимумы или как-то сдвинуты во времени для других случаев. Обширное исследование по 40 районам США за период более 250 лет провели Митчелл и Стоктон. Они подтвердили наличие не 11-летнего, а 22-летнего периода, который ранее был найден по сведениям о засу-

хах в США. Из-за этого ситуация с объяснением влияния солнечной активности усложнилась, поскольку вместо использования привычных индексов солнечной активности (солнечные пятна, поток радиоизлучения и т. п.), обладающих 11-летней периодичностью, необходимо обратиться к более экзотическим показателям, таким как 22-летние вариации общего магнитного поля Солнца и связанные с ними явления. Между тем 22-летняя периодичность свойственна геомагнитным возмущениям, которые вызваны воздействием солнечного ветра, а не вариациями электромагнитного излучения Солнца. Таким образом, возникла еще одна причина наметившегося смещения интересов от электромагнитного излучения Солнца к корпускулярному.

В поисках более объективных количественных показателей погодных явлений советские ученые использовали индекс циркуляции Е. Н. Блиновой, а американские обратились к так называемому индексу завихренности атмосферы, который может быть рассчитан объективно по картам погоды и характеризует определенную площадь, охваченную циклонами. Оказалось, что этот индекс связан с параметрами солнечного ветра и ММП, а именно с их крупномасштабной секторной структурой.

О поисках связи не только индекса завихренности, но и ряда других атмосферных процессов с секторной структурой говорится в обзоре Уилкокса и других работах. Такие поиски — одно из популярных направлений исследований сегодня; в нашей стране они начались работами Р. В. Смирнова (*Смирнов Р. В.*, ДАН СССР, 175(1), 76; 1967; 187(6), 1278, 1969). Результаты всех этих исследований показывают, что связь Солнце—погода, наиболее вероятно, проявляется через влияние солнечных корпускулярных потоков. Такое предположение уже выдвигалось неоднократно в прошлом, но теперь оно наполнилось новым содержанием. С другой стороны, роль электромагнитного излучения Солнца в настоящее время оспаривается.

На симпозиуме еще раз было подчеркнuto, что вариации полного потока излучения Солнца (солнечной постоянной) малы по сравнению с величиной 1—2 %, которая необходима для того, чтобы мог действовать механизм прямого влияния этих вариаций на погоду и вызвать изменение, например, индекса циркуляции на 5—10 %. По новым оценкам Хойта, приведенным в настоящей книге, из-за влияния солнечных пятен солнечная постоянная может уменьшаться, но даже при переходе от минимума к максимуму солнечного цикла — не более чем на 0,1—0,2 %. Добавим, что по непосредственным измерениям с высокой точностью, проведенным на спутнике SMM в 1980 г., обнаружено, что имеются более кратковременные (по-видимому, 27-дневные) вариации солнечной постоянной,

которые лежат в пределах 0,05—0,15 % (Wilson K. C. et al., Science 211(4483), 700, 1981). Таким образом, в дальнейшем предстоит еще оценить роль вариаций солнечной постоянной и то, насколько существенное воздействие они могут оказывать на погоду.

В статье известного специалиста по моделям атмосферы Волланда теоретически оценено, что при вариациях солнечной постоянной на 0,1 %, но со строгой периодичностью 27 сут, в атмосфере могут индуцироваться планетарные волны с амплитудой, на порядок меньшей, чем требуется по оценкам Кинга. А в статье Шефера на экспериментальном материале за 1949—1975 гг. показано, что волны с такой малой амплитудой (и даже в 4 раза большей) не удается обнаружить на фоне шумов.

Определенное внимание в книге уделено таким вопросам, как влияние движения планет и других космических факторов на солнечную активность и ряд земных процессов. Аналогичные вопросы обсуждались в Советском Союзе на совещаниях и всесоюзных конференциях, последняя из которых состоялась в июле 1981 г. в г. Кирове.

Что можно сказать о механизме влияния Солнца на погоду? В настоящее время сказать, что Солнце влияет на погоду, значит не сказать почти ничего. С тех пор, как впервые начали искать и установили некоторые признаки влияния солнечной активности на атмосферные процессы, многое изменилось. Например, в результате развития ракетных и спутниковых исследований в разных странах было найдено, что ряд явлений в верхней атмосфере (такие, как ионосфера, полярные сияния и т. п.) действительно прямо зависят от изменений интенсивности коротковолнового ультрафиолетового излучения и корпускулярных потоков, определяемых солнечной активностью. Механизм этого влияния в некоторых отношениях хорошо изучен и учитывается в прогнозах. Что касается влияния на погоду, то оно довольно ограничено и степень его пока не определена с помощью численных моделей. Пожалуй, наиболее ясно то, что такое влияние на погоду не одинаково и даже не однозначно в разных частях планеты. Имеются некоторые указания как на возможный рост эффекта к высоким широтам, так и на роль секторной структуры ММП.

Можно ли из этой информации вывести какие-либо ценные суждения и выводы для практики? Тут мнения расходятся.

Совершенно очевидно, что ситуация изменилась по сравнению с той, когда совсем не было известно, влияет ли Солнце на погоду вообще. Наряду с этим если бы влияние Солнца на погоду носило планетарный характер (как наблюдается в случае ионосферы или температуры и плотности верхней атмо-

сферы), то следовало бы искать связь с вариациями электромагнитного излучения Солнца. На самом деле теперь представляется более разумным обратиться к какому-либо другому сложному непрямоу механизму, учитывающему адаптацию погоды к вариациям солнечного ветра. Поскольку вероятным элементом погоды, который, по-видимому, зависит от секторной структуры, является индекс циркуляции (или завихренности) атмосферы, то, возможно, в высоких широтах изменяется скорость образования циклонов и антициклонов или их число. Однако последнее заключение уже не следует строго из упомянутых выше фактов и является гипотетическим, как и ряд других предположений о конкретных механизмах влияния солнечного ветра на погоду.

Интерес к солнечному ветру особенно сильно возрос, когда выяснилось, что ряд погодных процессов (в частности, циклогенез, или развитие циклонов, в северном полушарии) связан с пересечением Землей при движении по орбите секторных границ магнитного поля солнечного ветра в межпланетном пространстве. Как уже отмечалось, ряд работ, помещенных в этой книге, посвящен исследованию погодных эффектов, связанных с пересечением секторных границ. Можно констатировать, что возникло новое направление исследований, но, как и ранее, остается проблемой — выяснить механизм влияния таких пересечений на нижнюю атмосферу. Во всей цепи процессов наиболее понятным представляется воздействие солнечного ветра на полярную область и зону полярных сияний. Поскольку не ясен дальнейший путь передачи этого воздействия: через образование атмосферных волн, или через электрические поля, или как-то еще, — приобретает особо актуальное значение проведение специальных исследований приполярных областей планеты и их связи с более низкоширотными областями. При этом проблемы, связанные с учетом поглощения электромагнитного излучения Солнца в атмосфере Земли, заменяются новыми. Принципиально иного подхода требует решение старой задачи о передаче воздействия по вертикали от верхней атмосферы к нижней, коль скоро речь идет о полярных областях (и корпускулярных потоках, а не электромагнитном излучении Солнца). Кроме того, добавляется новая проблема о передаче воздействия по горизонтали от полярных областей к более низким широтам.

Помимо ознакомления с новыми фактами, предложенными механизмами и методами их проверки советскому читателю интересно будет узнать о программе дальнейших исследований, намечаемой американскими учеными. В этой программе проявляются и практическая направленность, и масштабность предлагаемых экспериментов и работ на будущее. В то же время

очевидно, что ряд крупномасштабных проектов, носящих планетарный характер, можно осуществить лишь путем международного сотрудничества.

Следует сделать замечание о структуре книги. В ней по существу имеются две вводные статьи. Первой поставлена статья редакторов Мак-Кормака и Селиги, которая кроме краткого введения и перечисления основных проблем содержит обширное изложение итогов работы симпозиума по основным разделам исследований и замыкается двумя общими резолюциями. Таким образом, читателю предлагается сразу начать с результатов работы симпозиума. Фактическим введением служит обзор Робертса, одного из наиболее известных энтузиастов изучения проблемы влияния Солнца на погоду и климат. В этом обзоре, как и в статьях Питтока и др., без указания на источники использованы цитаты из монографии Монина и сборника трудов I Всесоюзного совещания, указанных нами в начале предисловия.

Таким образом, проблема, которой был посвящен симпозиум, не нова, но актуальность ее не уменьшается. Одно время делались попытки закрыть ее, однако это тот случай, о котором говорят, что факты упряма вещь. Как видно из работ симпозиума, за последнее время получены новые свидетельства о влиянии солнечной активности на погоду и климат не только с 11- и 22-летними периодами, но и в масштабе нескольких дней. Показано, что без учета этого влияния прогнозы погоды ухудшаются. Хотя механизм его пока выяснить не удалось, предложено несколько интересных гипотез. В ряде статей анализируются причины, затрудняющие разработку адекватного физического механизма. Они общие и для других разделов гелиогеофизики, поскольку механизмы, управляющие солнечной активностью и планетарной циркулирующей атмосферы, пока также не ясны.

Материалы настоящей книги представляют интерес для специалистов различного профиля, связанных в своей работе с проблемой влияния солнечной активности на формирование погоды и климата и с вопросами учета этого фактора в краткосрочных и долгосрочных прогнозах погоды.

Перевод книги осуществлен А. А. Нусиновым, В. И. Рождественской, Р. В. Смирновым и Е. Д. Стукиным.

Г. Иванов-Холодный

В этой книге собрано большинство научных докладов и сообщений, представленных на симпозиум и рабочее совещание по влиянию солнечной активности на погоду и климат, который состоялся 24—28 июля 1978 г. в Университете штата Огайо. Авторы и издатели сделали все возможное для ускорения их публикации. Объем отдельных докладов, включенных в книгу, намеренно ограничен редакторами.

Непосредственное финансирование симпозиума было обеспечено НАСА.

*Билли Мак-Кормак
Томас Селига*

ИТОГИ СИМПОЗИУМА И РАБОЧЕГО СОВЕЩАНИЯ

Б. М. Мак-Кормак, Т. А. Селига

А. ВСТУПЛЕНИЕ

Симпозиум и рабочее совещание, посвященные влиянию солнечной активности на погоду и климат, были проведены в Университете штата Огайо 24—28 июля 1978 г. Целью их было представить и обсудить на международном форуме результаты недавних исследований и идей, касающиеся вопроса, влияют ли изменения солнечного излучения на погоду и климат на Земле и если это так, то в какой степени и посредством каких механизмов. Большое внимание на симпозиуме было уделено результатам ранее проведенных исследований. Были рассмотрены заказные доклады и научные сообщения. С другой стороны, работа симпозиума заложила основы для развития планов и направлений будущих исследований.

В работе симпозиума приняли участие свыше ста человек из восьми стран. Они представляли исследовательские институты, университеты, частные промышленные и федеральные агентства; их профессиональные интересы охватывали широкий диапазон от практических задач метеорологии до физики Солнца. Большое время было отведено дискуссии; это привело к интенсивному обмену мнениями между представителями разных специальностей и способствовало увеличению научной значимости симпозиума.

1. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияет ли изменчивость Солнца на погоду и климат? Это фундаментальный вопрос, ответы на который могут иметь важные практические применения для долгосрочных прогнозов погоды и климата. К сожалению, мы еще не в состоянии на него ответить, хотя данных о наличии важных связей между изменчивостью Солнца и тропосферными явлениями за последнее десятилетие получено очень много. Ясно, что энергетика солнечных изменений недостаточна для того, чтобы оказывать

B. M. McCormac. Lockheed Palo Alto Research Laboratory, Palo Alto, CA 94304 USA.

T. A. Seliga. Atmospheric Sciences Program. The Ohio State University, Columbus, OH 43210 USA.

значительное и непосредственное воздействие на тропосферные и стратосферные процессы. Следовательно, если корреляция между солнечной активностью и эффектами в нижней атмосфере указывает на действительные физические связи, то обеспечивающие их механизмы, вероятно, должны быть весьма тонкими. Они могут быть, например, триггерные эффекты, связанные с изменениями концентрации O_3 в стратосфере или изменениями электрических характеристик атмосферы.

Солнечно-атмосферные связи могут включать периоды от нескольких суток до тысяч лет. Теория Миланковича изменения климата вследствие колебаний солнечной инсоляции, обусловленных изменениями земной орбиты в течение длительного периода, является широко распространенным примером того, насколько протяженными могут быть периодические изменения климата. Другие более короткие, но важные для человечества циклические эффекты связаны с засухами, возникновением гроз, атмосферной завихренностью, взаимодействием стратосферы и тропосферы и изменениями глобальной картины распределения давления и кинетической энергии атмосферы. В частности, 22-летняя периодичность региональных засух в западной части США хорошо коррелирует с хэйловским циклом солнечных пятен, который влияет на ориентацию межпланетного магнитного поля. Интересно, что другое, наиболее поразительное свидетельство солнечных воздействий с периодом всего в несколько суток связано с корреляцией между пересечениями границы секторов межпланетного магнитного поля на орбите Земли и изменениями атмосферной завихренности, измеренной с помощью индекса завихренности атмосферы VAI. Возможно, эти явления дадут нам сведения относительно роли межпланетного магнитного поля (ММП).

Другие возможные воздействия Солнца связаны с 11-летним циклом солнечных пятен, 27-дневным периодом вращения Солнца и особыми солнечными явлениями, такими как вспышки и корональные дыры. Все возрастают доказательства того, что эти явления могут воздействовать на погоду или в течение цикла, или в течение нескольких суток в случае особых явлений на Солнце.

Практическое использование изменчивости Солнца в качестве инструмента для прогноза погоды и климата, отличное от эмпирических подходов, еще предстоит развить. Тем не менее есть основания говорить о том, что прогнозы погоды могут зависеть от процессов, происходящих на Солнце. Если удалось бы точно доказать эту зависимость, тогда действительно был бы доказан смысл исследований влияния солнечной активности на погоду и климат.

2. ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ РАБОЧЕГО СОВЕЩАНИЯ

Указанные выше вопросы доминировали в работе симпозиума и привели к организации рабочего совещания, которым закончился симпозиум. Обсуждения на заседаниях были направлены на то, чтобы наметить направления будущих исследований по проблеме «Солнце—погода—климат». Для этого были приглашены представители шести рабочих групп. Рабочие группы занимались следующими вопросами: 1) исследование корреляционных связей; 2) влияние солнечной активности на общую циркуляцию и модели климата; 3) взаимодействие нижней и верхней атмосферы, включая электрические характеристики; 4) планетные движения и другие косвенные факторы; 5) экспериментальные подходы к изучению зависимости погоды от процессов на Солнце и 6) роль малых атмосферных составляющих. Последнее заседание симпозиума в пятницу утром было посвящено подведению итогов рабочего совещания по представлению председателей каждой рабочей группы, а также общей дискуссии. Кроме того, рабочее совещание создало группу для рассмотрения двух необходимых резолюций, которые следует распространить в соответствующих научных организациях всего мира. Полный текст этих резолюций дан в заключениях рабочего совещания.

Б. ОТЧЕТЫ РАБОЧЕГО СОВЕЩАНИЯ

1. ИЗУЧЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ

Председатель: Дж. М. Митчелл мл. (НОАА, Служба окружающей среды, Силвер-Спринг, шт. Мэриленд, США).

В основу рассмотрения корреляционных связей были положены два основных принципа:

1. Внимание должно быть сосредоточено главным образом на том, *как* подойти к решению основных проблем, *как* объяснить явления и причинно-следственные механизмы и *как* проверить гипотезы.

2. Усиленного изучения заслуживают три основные категории явлений и временных шкал:

а) эффекты «Солнце—погода» с периодами в несколько дней и недель, например связанные с индексом завихренности атмосферы VAI;

б) эффекты «Солнце—климат» в масштабе лет и десятков лет (т. е. цикл солнечных пятен и хэйловский магнитный

цикл), вызывающие засухи, блокирование*), случаи стратосферного потепления и другие крупномасштабные эффекты атмосферной циркуляции;

в) длиннопериодные климатические явления (например, малый ледниковый период), отнесенные к явлениям типа минимума Маундера аномального поведения Солнца длительностью в сотни и тысячи лет.

Несмотря на то что долгопериодные явления, относящиеся к пункту «в», не рассматривались подробно на этой конференции, они признаны важной областью исследований и будут одной из актуальных тем будущих конференций.

Изучение корреляционных связей содержит три аспекта: отбор данных, методы проведения статистического анализа данных и специальные вопросы. Рассматривались также проблемы, которые в будущем потребуют усиленного внимания.

1.1. Отбор данных

Выбор данных, используемых при изучении корреляционных связей, должен основываться на следующих соображениях:

1. *Источник данных.* Во-первых, широко известные источники являются обычно наиболее надежными и наиболее подходящими для исследований. Однако при этом необходимо учитывать замечания относительно правдоподобия и ограниченности используемых данных.

2. *Качество и однородность данных.* Особенно для случаев, охватывающих многолетний период, непрерывность процесса наблюдений и однородность условий наблюдения не должны считаться доказанными, а проверяться на достоверность. Множество долгопериодных метеорологических рядов было искажено при перемещениях станций, при изменении способов наблюдения или постепенных изменениях косвенных факторов, вызванных урбанизацией или другими воздействиями окружающей среды. Подобными примечаниями не всегда сопровождаются публикуемые данные.

3. *Репрезентативность данных в пространстве и времени.* Примером являются данные по осадкам для изолированной станции, особенно если она расположена в полусухой зоне. Это может быть внушающая подозрения усредненная оценка количества осадков в области, окружающей станцию. Данные об осадках, собранные по многим станциям в опреде-

* Под этим термином подразумевается блокирование зонального течения в тропосфере и усиление междуширотного воздухообмена.—Прим. перев.

ленном районе, представляют наиболее приемлемый материал для использования в зависимости от характера изучаемого вопроса. Другим примером являются данные по частоте гроз, основанные на совместных отчетах станций в США. Инструкция по составлению отчета для наблюдателей за грозовой активностью имеет неопределенный характер и оставляет простор для субъективных заключений. Например, если грозу видно на расстоянии, то неясно, регистрировать ли ее так же, как и над точкой наблюдения, или нет. Таким образом, оценка полной частоты гроз может зависеть от индивидуальной интерпретации наблюдателем инструкции для составления отчета по грозовой активности.

4. *Физическое соответствие* данных. Многие виды данных, относящиеся либо к Солнцу, либо к атмосферным явлениям, являются признаками (или коррелятами) физических процессов, но не являются параметрами самих физических процессов. Возникает вопрос, какова эффективность таких данных в объяснении физических связей между Солнцем и погодой или климатом в сравнении с другими, более фундаментальными данными.

В дополнение ко всему вышесказанному отбор данных для изучения влияний солнечной активности на погоду или климат предусматривает необходимую компетентность и проведение экспертиз в области климатологии и физики Солнца для обеспечения наиболее квалифицированного отбора и оценки данных во избежание дальнейших трудностей при последующей интерпретации результатов.

1.2 Проведение статистического анализа данных

Имеется несколько соображений относительно проведения в будущем статистических исследований, касающихся влияния Солнца на погоду и климат:

1. Прежде чем приниматься за какой-либо анализ данных, необходимо знать и понимать статистические характеристики этих данных в пространстве и во времени.

2. Важно не рассматривать статистические методы как магический «черный ящик» и критически относиться к условиям их применения. Для любых данных или способа анализа должна обеспечиваться законность использования этих методов.

3. Методы статистического анализа следует выбирать в зависимости от особенностей данных в соответствии с целью анализа. Особые проблемы возникают, когда:

а) непрерывный процесс в одной среде коррелируется с импульсными явлениями в другой среде;



б) многократные события в одной среде коррелируются с событиями в другой или события повторяются в быстрой последовательности;

в) может произойти путаница, например, из-за близости 27-дневного периода вращения Солнца и периода лунного приливного возмущения порядка 27—29 сут.

4. В случаях, когда в связи с особенностями статистических свойств данных или со сложностями экспериментальных измерений применимость стандартных проверок статистической значимости результатов становится сомнительной, необходимо использовать эксперименты, основанные на методе Монте-Карло, для воссоздания условий, соответствующих нулевой гипотезе. Возможности современных ЭВМ делают этот подход к проверке значимости не только выполнимым, но часто и экономичным.

5. Важно отдавать себе отчет об опасностях проверочных гипотез, выработанных апостериори на основе уже полученных данных,— в тех случаях, когда результаты корреляционного анализа являются единственным основанием для интерпертации и не имеется составленных заранее гипотез. При их оценке всегда появляется риск, что выводы могут оказаться предвзятыми за счет способа отбора данных и не имеют никакой реальной значимости. Когда такие гипотезы распространяются и на ряд деталей, полученных вместе с основным результатом, то можно прийти к полному соответствию между гипотезами и данными, которое ни о чем не говорит.

6. Единственным серьезным подтверждением правильности результатов корреляционного анализа является воспроизведение полученных результатов в независимой серии данных. Под «независимой серией данных» обычно имеют в виду данные, собранные в различные периоды времени и в разных местах. В большинстве случаев какой-либо атмосферный параметр, измеренный в одном месте, хорошо коррелирует с тем же параметром, полученным в то же самое время в другом районе даже на межконтинентальных расстояниях. В случае когда не имеется дополнительных данных, полученных в другой период времени, воспроизводимость результатов нужно исследовать на различных выборках первоначального ряда данных.

Во всех представленных выше соображениях для проведения и интерпертации результатов любого статистического корреляционного анализа необходим высокий уровень компетентности в математической статистике, гарантирующий наилучшее понимание назначения эксперимента и получение наиболее реалистической оценки статистической значимости результатов.

1.3. Специальные вопросы

К корреляционным исследованиям относится множество вопросов. Это следующие специальные вопросы:

1. *Какие аспекты погоды и климата стоит исследовать в связи с их наибольшей перспективностью или значимостью?* Ясно, что проблему связи погоды и климата с процессами на Солнце не решить, рассматривая все возможные зависимости для всех периодов. Однако в целом особого внимания заслуживает двух- и трехмерное описание атмосферных процессов, например:

а) динамическая структура волн с малыми волновыми числами (длинные волны) в атмосферной циркуляции;

б) энергетика атмосферных процессов и их изменение со временем;

в) крупномасштабная картина климата и ее особенности, такие как явления блокирования и стратосферные потепления.

Для дальнейшего развития уже ведущихся работ можно было бы рекомендовать следующие исследования:

а) суточные изменения положений гребень—ложбина и крупномасштабных индексов циркуляции, особенно на уровнях 500 и 300 мбар;

б) ежедневные измерения ионосферного потенциала;

в) суточные значения по спутниковым данным земного потока ИК-излучения, характеристик облачного покрова, грозовой активности, распределения озона и т. д.;

г) ежедневные проверки данных прогноза погоды и высокоуровневых прогностических карт НОАА/НМЦ и др.

2. *Какова преемственность между короткопериодными солнечно-погодными и долгопериодными солнечно-климатическими связями?* Можно ли сказать, что короткопериодные связи, учитывая их характер, подобны в совокупности долгопериодным связям или нет? Каким образом короткопериодные связи зависят от фаз более длиннопериодных солнечных циклов? В состоянии ли Солнце совершенно по-иному воздействовать на долгопериодные связи по сравнению с короткопериодными? Ответы на эти вопросы позволят установить, проводить ли исследование солнечно-земных эффектов с различными временными масштабами — от дней до лет и сотен лет — на основе некоторого одного унифицированного подхода или совершенно различных независимых подходов.

3. *Как объяснить загадку очевидной эффективности воздействия 22-летнего магнитного солнечного цикла (в противоположность видимой неэффективности воздействий 11-летнего солнечного цикла) на нижнюю атмосферу и на климат?* В исто-

рическом плане исследования 11-летних солнечно-климатических связей часто приводили к неожиданным и противоречивым результатам. С другой стороны, некоторые новые исследования влияния 22-летнего солнечного цикла на климат дали определенные и хорошо согласующиеся результаты. Осуществляется ли заметное 11-летнее воздействие на климат, подобное четкому 11-летнему влиянию Солнца на состояние верхней атмосферы? Существует ли в действительности солнечный магнитно-активный агент, который влияет на климат, или излучение Солнца может изменяться с периодом 22 года и не проявляться в 11-летнем цикле? Это очень сложные вопросы, которые наводят на мысль, что существующее положение требует проведения таких исследований, в которых можно было бы разделить климатические данные по фазам 22-летнего магнитного цикла, но с достаточной гибкостью, что позволило бы выделить 11-летнюю гармонику в данных, если она существует. С помощью этого способа можно было бы сформулировать результаты анализа в рамках 11-летней периодичности (если она подойдет), и тогда не нужно предпринимать дальнейших поисков 22-летних эффектов.

4. *Что можно сказать о соотношении между статистической и практической значимостью результатов корреляционных исследований?* Если результат статистически значим, он может быть, а может и не быть важным для практики прогноза погоды и климата. Множество очевидных связей погоды и климата с изменчивостью Солнца достигают статистически достоверных уровней, но не имеют практической значимости. В таких случаях следует подчеркнуть, что статистическая значимость способствует выявлению физических процессов и причинно-следственных закономерностей независимо от того, используются ли они для прогноза. Но оба этих вида значимости необходимо различать.

1.4. Вопросы, нуждающиеся в особом упоминании, и перспективные направления

Были выделены четыре основных вопроса и перспективных направления:

1. *Необходимость непрерывного своевременного опубликования основных солнечных и климатических данных:*

а) крайне необходимо, чтобы ряды определенных солнечных индексов, широко используемых при изучении солнечно-атмосферных связей, были непрерывными (см. резолюцию II «О рядах солнечно-геофизических данных»);

б) основные первичные спутниковые и атмосферные данные (включая оперативные ленты НМЦ за прошлые периоды)

желательно сохранять как ценный источник для солнечно-погодных и солнечно-климатических исследований;

в) НОАА и другие агентства, обеспечивающие определенный режим сбора солнечных и атмосферных данных, должны установить способы наиболее быстрой доступности этих данных для тех, кто занимается солнечно-погодными и солнечно-климатическими исследованиями.

2. *Возможности применения новых спутниковых данных и других новых рядов данных.* Большое значение для солнечно-погодных и солнечно-климатических исследований имеет публикация информации планетарного масштаба для ряда солнечных и атмосферных параметров. Сюда входят:

- а) случаи грозовой активности;
- б) данные об ионосфере;
- в) индексы облачности планетарного масштаба;
- г) потоки радиации (солнечное излучение и крупномасштабное земное).

Важно, чтобы информационные связи между учеными и НОАА и другими источниками солнечных и атмосферных данных оставались открытыми и своевременными для обеспечения обработки и сохранности данных, что в будущем поможет исследованию солнечно-атмосферных связей.

3. *Возможности для расширения рядов солнечных и климатических данных на прошлые столетия и тысячелетия.* Реконструкция солнечных и климатических изменений в прошлом с помощью косвенных методов открывает большие перспективы для изучения поведения Солнца в настоящее время и обнаружения долгопериодного влияния Солнца на климат. Эти работы очень важны, и реализация подобных возможностей сулит успех.

4. *Важность подробного изучения отдельных событий.* Поскольку как солнечные, так и атмосферные явления очень сложны, для выявления солнечно-погодных связей необходимо весьма тщательное и доскональное исследование этих явлений и их временных связей для выбранных интервалов времени, непосредственно предшествующих (если возможно) ключевым солнечным событиям и следующим за ними. В идеальном случае выбранные интервалы должны определяться в реальном масштабе времени с постановкой специальных наблюдений (с помощью радиозондов, ракет и т. д.) для получения подробной информации по следующим вопросам:

- а) движения тропопаузы и ее тонкая структура;
- б) вертикальное распределение озона;
- в) вертикальное распределение стратосферных частиц (используя лидар);

- г) вертикальный градиент электрического потенциала с высокой разрешающей способностью;
- д) вертикальный профиль удельной электропроводности и
- е) скорость ионизации и соответствующие реакции ионов с газовыми составляющими в стратосфере.

Накапливая результаты детальных измерений по выбранным интервалам времени и оценивая их с помощью теории случайных процессов, можно было бы рассортировать явления как связанные с Солнцем, так и с атмосферой. Возможно, они составляют цепи причинно-следственных зависимостей и удастся отличить их от других явлений на основе не свойственных им временных связей.

2. СОЛНЕЧНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГЛОБАЛЬНУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ И МОДЕЛИ КЛИМАТА

Председатель: К. Дж. Е. Шуурманс (Королевский метеорологический институт, Нидерланды).

Моделирование атмосферы представляет собой один из подходов к изучению предполагаемых физических механизмов, связывающих солнечную активность с погодой и климатом. Существует или находится в развитии целая иерархия таких моделей. Поэтому важно учесть некоторые соображения, чтобы использовать потенциальные возможности моделирования при исследовании солнечно-погодных и солнечно-климатических связей.

2.1. Возможные физические механизмы

Ниже перечислен ряд физических механизмов, способных объяснить солнечные воздействия на погоду и климат; их же можно использовать при построении моделей:

- 1) солнечно-обусловленные изменения в содержании и распределении O_3 ;
- 2) вариации солнечной постоянной как регулярные, так и нерегулярные;
- 3) вариации солнечного УФ-излучения;
- 4) изменения в термической или динамической структуре верхней атмосферы и
- 5) изменения атмосферного электрического поля.

2.2. Выбор моделей

Имеется иерархия атмосферных моделей от моделей планетарной циркуляции и климата до моделей урагана, конвективной облачности и т. д. Модели планетарной циркуляции, по-ви-

димому, в настоящее время не часто используются для солнечно-погодных и солнечно-климатических исследований. Они сложны для работы, и, когда механизм известен только частично, трудно поместить его в такие сложные модели и ожидать получения многообещающих результатов. Чаще начинают с опытных расчетов, используя очень простые модели распределения O_3 или чувствительность атмосферы к изменению солнечной постоянной можно исследовать с помощью моделей, которые усредняются по высоте и долготе.

2.3. Возможные эксперименты

Можно предложить четыре конкретных модельных эксперимента. При этом нужно исследовать степень реакции атмосферы на определенные изменения, варьируя амплитуду входного параметра и анализируя выходной параметр как результат воздействия. Хотя относительная величина изменений амплитуды в таких экспериментах на ЭВМ может отличаться от реальных, значимость этих изменений можно оценить.

1) *Конвективные возмущения.* Первый из предлагаемых экспериментов связан с фоновыми изменениями электрического поля в облаках. В исследуемой модели конвективного облака должно учитываться влияние на облака изменений атмосферного электрического поля. Следует видоизменить существующие модели облачности или же разработать новые модели, включив в рассмотрение это электрическое поле.

2) *Распределение O_3 в высоких широтах.* Второй эксперимент состоит в изменении величины и (или) вертикального распределения O_3 только в авроральной зоне. Это можно сделать в любой трехмерной модели, включающей озон, его излучение и химические свойства.

3) *Поток ультрафиолетового излучения.* Третий эксперимент — изменение потока УФ-излучения. Подобный эксперимент можно произвести для простой модели баланса энергии, в которой вычисляется состояние радиационного равновесия и которая включает фотохимию стратосферы. По такой модели можно рассчитать реальное равновесие в тропосфере путем включения некоторых конвективных регулирующих схем. Получив любые обнадеживающие результаты, можно затем поставить эксперименты, в которых изменение потока УФ-излучения нужно сочетать с более сложными моделями, включающими трехмерную модель планетарной циркуляции.

4) *Предсказание погоды.* Четвертый эксперимент — попытка косвенной оценки солнечных эффектов путем сравнения числен-

ных прогнозов погоды (поля скоростей ветра) для ключевых дней с наблюдаемыми полями.

Такие исследования позволят сравнить как точность или отклонения для компонент с различными волновыми числами, так и степень корреляции между результатами вычислений и наблюдениями.

3. ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ — СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА — КЛИМАТ

Председатель: Х. П. Слипел («Кентрон интернэшнл», Хантсвилл, шт. Алабама, США).

Существует предположение о возможном воздействии движений планет на солнечную активность, на погоду и климат Земли. В частности, важно изучить возможные физические связи между планетными движениями, солнечной активностью и погодой и климатом Земли. Уровень развития этих идей, вероятно, сравним с состоянием проблемы солнечно-атмосферных связей 10—15 лет назад. Два соображения делают своевременным детальное изучение этого вопроса: современное состояние исследований влияния изменчивости Солнца на погоду и климат и возможности для разработки детерминированных моделей изменения погоды и климата.

3.1. Главные направления исследований

Основной вопрос рассматриваемой темы попадает в общем в следующие категории:

1) взаимодействия между главными астрономическими телами в Солнечной системе по мере ее развития в замкнутую систему с нелинейной фазой;

2) влияние изменений в положении или движении планет на динамику Солнца и, как результат этого, развитие солнечных пятен и вспышечной активности;

3) влияние изменений солнечной активности на солнечный ветер и атмосферы планет;

4) влияние изменений в положении или движении всех планет на динамику каждой отдельной планеты.

3.2. Рекомендации

Если на погоду и климат оказывает воздействие солнечная активность, на которую в свою очередь влияют положение и движение планет, в таком случае нужно разработать модели

для объяснения этих синергических процессов. Полное понимание этих процессов позволит давать более точные прогнозы погоды и климата и в конечном счете приведет к разработке новых методов управления климатом. Необходимо улучшить обмен информацией между различными специалистами, работающими в этой области.

Важно усовершенствовать диагностические и прогностические модели изменения параметров Солнечной системы, способных воздействовать на солнечную активность или на погоду и климат в планетарном масштабе. Эти модели охватывают вопросы от влияния эволюции Солнечной системы на орбитальное и осевое движения Земли до их воздействия на климат (например, по модели Миланковича) или погоду на Земле. В частности, сюда относятся влияние планет на возникновение солнечных пятен и вспышек, а также воздействие Луны на погоду Земли.

В настоящее время имеется несколько моделей. Модель Мёрса и Шламмингера постулирует возможность обмена между планетарным моментом импульса и вращением Солнца благодаря взаимодействию между планетами. Эту модель можно упростить до задачи трех тел и более детально разработать динамику.

Физико-статистическая модель Брайнера — это эмпирическая модель, придающая особое значение точным статистическим тестам. В модели планетного резонанса Слипера—Хозе предполагается, что и временные ряды солнечных пятен, и климат имеют нестационарные характеристики и что смена эпох происходит при определенных соотношениях между фазами планет. При совпадении нескольких планетных резонансов могут происходить смена числа солнечных пятен и климатические изменения. Нечто подобное имело место около 1800 и 1880 гг. Важные изменения климатического режима происходили также в 1923 и 1961 гг. Эта модель, в противоположность другим моделям солнечных пятен, предсказывает также, что максимум 21-го цикла солнечных пятен будет иметь небольшую величину.

Поскольку из некоторых моделей следует, что изменения климатического режима уже происходят или будут происходить в ближайшем будущем, необходимо безотлагательно развивать и улучшать эти модели. Необходимо развивать и тщательно исследовать сравнительные тесты для сопоставления прогнозов, основанных на резонансной и других моделях, с существующими солнечной активностью и климатом Земли.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ, СВЯЗЬ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Председатель: Р. Н. Сингх (Технологический институт Баранасского университета, Варанаси, Индия).

Возможны несколько механизмов взаимодействия нижней и верхней атмосферы, включая связь через электрическое поле, которая может оказаться важной для осуществления солнечного влияния на погоду и климат. В этом отношении удобно разделить атмосферу на две области, а именно погодную область от 0 до 20 км и область верхней атмосферы от 20 км* и выше, включая магнитосферу. Возникает очевидная необходимость в детальном изучении этих двух областей, и в частности происходящих в них долгопериодных и короткопериодных явлений.

4.1. Солнечная постоянная и солнечная излучательная способность

В литературе часто встречается утверждение, что солнечная постоянная практически неизменна. Хотя это справедливо для относительно длительных периодов и интегральной солнечной постоянной, необходимо иметь данные о вариациях солнечного излучения в различных диапазонах частот. Известны кратковременные изменения излучения Солнца, такие как усиления крайнего ультрафиолета, импульсов жесткого рентгеновского излучения и потоков энергичных частиц. Повышенное излучение из активных областей солнечного диска вызывает кратковременные эффекты в атмосфере Земли. Кроме того, радиация с различной частотой и интенсивностью будет влиять на различные слои земной атмосферы.

Признано, что корональные дыры являются источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра. Эти потоки, как известно, взаимодействуют с геомагнитным полем и сжимают плазмосферу. Частицы потока плазмы проникают в атмосферу на дневной стороне через полярную область, а на ночной стороне — после ускорения через нейтральную точку в области плазменного слоя. Эти частицы несут достаточно энергии для возбуждения магнитных суббурь, обладающих большой энергией. Основной поток энергичных частиц вызывает полярные сияния и изменяет общую удельную проводимость высокоши-

* Обычно термины «верхняя атмосфера» относят к высотам более 60—80 км.— *Прим. ред.*

ротного слоя. Частицы наиболее высоких энергий, проникая в атмосферу, создают рентгеновское тормозное излучение, которое достигает гораздо более низких высот и изменяет удельную проводимость в этой области атмосферы.

Солнечное крайнее ультрафиолетовое и рентгеновское излучения, потоки плазмы и межпланетное магнитное поле создают возмущения атмосферы Земли, иначе говоря, способствуют нарушению ее устойчивого гидродинамического состояния. Возмущения верхней атмосферы, как известно, генерируют волны различных видов, полярные сияния, джоулев нагрев и электромагнитную индукцию у поверхности земли. Гравитационные волны — один из важных видов волн; они переносят энергию из нижних слоев атмосферы вверх. Понятно, что отражение этих волн от верхней атмосферы и их последующее поглощение в нижних слоях может влиять на синоптические процессы.

Считается, что слой O_3 и его изменения под действием солнечного УФ-излучения и потока космических лучей являются средством контроля за балансом энергии погодной области (от 0 до 20 км) и могут представлять собой необходимый спусковой механизм. Лабораторные эксперименты, касающиеся реакции слоя O_3 на крайний ультрафиолет, рентгеновские лучи, энергичные частицы и некоторые примеси, позволяют получить ценную информацию о роли слоя O_3 .

Механизмы взаимодействия погодной области с верхней атмосферой и магнитосферой еще находятся в начальной стадии разработки, и ими часто пренебрегают в свете приблизительной неизменности солнечной постоянной. Однако грозная активность и атмосферное электричество являются процессами, в которых может быть достаточно энергии, «необходимой» для осуществления солнечно-атмосферных связей, хотя эти процессы и не зависят от изменения солнечной постоянной. Интересно отметить, что мощность грозных явлений в нижней атмосфере имеет тот же порядок величины, что и мощность суббурь в ионосфере, т. е. от 10^{10} до 10^{11} Вт. Видимо, наиболее важным вопросом является следующий: каким образом грозная активность в качестве контролирующего источника энергии для короткопериодных эффектов управляется изменением проводимости всей ионосферы. Состояние знаний по этому вопросу, хотя и ограниченное, немного лучше, чем в отношении других механизмов взаимодействия, и основано на более прочном научном фундаменте. Тем не менее требуются детальные исследования для уточнения роли короткопериодных изменений солнечной ионизирующей радиации, потоков солнечных энергичных частиц и галактического излучения. Кроме того, немалую роль

может играть удельная проводимость нижней и верхней атмосферы; поэтому следует вести ее непрерывную регистрацию с помощью широкой сети датчиков, установленных на земле и на самолетах.

Осуществлять взаимодействие верхней и нижней атмосферы могут и некоторые ядра конденсации. В частности, образование под действием космических лучей ядер переохлажденной воды в верхней части облаков может приводить к передаче энергии космических лучей нижней атмосфере.

4.2. Рекомендации

В свете вышесказанного можно наметить ряд направлений будущих исследований. Они выражаются в следующих рекомендациях:

1. Долгопериодные и кратковременные солнечные эффекты должны быть охарактеризованы с учетом их энергетики и спектральных свойств, известных тем, кто изучает солнечно-погодные явления.

2. Нужно тщательно изучить изменения проводимости в верхней атмосфере и магнитосфере, обусловленные солнечным электромагнитным излучением и потоками солнечных энергичных частиц, так как они могут иметь отношение к изменениям свойств электрических генераторов в погодной области между 0—20 км.

3. Долготные и меридиональные цепочки наземных станций должны работать во взаимодействии со спутниковыми измерениями электрических характеристик с высоким пространственным и временным разрешением.

4. Необходимо исследовать модуляцию космических лучей под действием межпланетного магнитного поля, для того чтобы определить их воздействие на временные и пространственные вариации ионосферной проводимости.

5. Синоптические исследования проводимости, скорости ионообразования и ионосферного электрического потенциала в области 0—25 км с проведением измерений по крайней мере один раз в сутки; следует обеспечить возможность и более частых измерений, необходимых в специальных случаях.

6. Возможное образование переохлажденных ядер конденсации воды в верхней части облаков за счет космических лучей необходимо исследовать как теоретически, так и экспериментально.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНО-АТМОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ

Председатель: Р. А. Гольдберг (Лаборатория атмосферных исследований, НАСА, Годдардовский центр космических полетов, США).

Актуально необходимо развивать экспериментальные методы выявления, проверки и оценки причинных механизмов в области солнечно-атмосферных исследований. Нужны также соответствующие специальные измерения для статистических исследований, которые могли бы более близко связать причину и следствие, чем имеющиеся в нашем распоряжении ряды данных и корреляционные связи. На этих предпосылках основаны перечисленные ниже предметы исследования и рекомендации.

5.1. Солнечные излучения

При изучении реакции атмосферы на солнечные активные излучения и их прямые или косвенные эффекты мы имеем дело с тремя основными категориями солнечных агентов:

- 1) корпускулярное излучение,
- 2) электромагнитное излучение и
- 3) флуктуации магнитного поля.

Все они могут вызывать возмущения химических, динамических, электрических и тепловых свойств атмосферы.

5.2. Специальные темы

В рамках разд. 5.1 для безотлагательного (в ближайшие пять лет) изучения выбраны следующие темы, связанные с реакцией атмосферы на явления солнечной активности:

- 1) солнечные излучения;
- 2) взаимодействие верхней атмосферы с нижней;
- 3) изменение состава и фазового состояния атмосферы;
- 4) реакция атмосферы на высыпание в высокие широты частиц высоких энергий;
- 5) изменения атмосферной циркуляции;
- 6) структура электрического поля атмосферы и связанные с ним эффекты;
- 7) структура атмосферных волн и связанные с ними эффекты.

5.3. Рекомендации

Следующие рекомендации можно рассматривать в качестве ориентиров при составлении программы, предназначенной для исследования названных выше тем:

1. Проведение координированных экспериментов, включающих методы измерения излучений Солнца, процессов взаимодействия и атмосферной реакции. Сюда относятся:

а) организация многоотраслевых научных групп для планирования экспериментов на следующий год;

б) отбор специальных научных приборов. Число их будет возрастать по мере исследования процессов, которые необходимо изучить экспериментальным путем для любого предложенного механизма связи погоды с солнечной активностью. Одновременно должна быть выяснена необходимость разработки новой технологии.

2. Когда это возможно, необходимо координировать такие исследования с экспериментами, предназначенными для оценки антропогенных воздействий на атмосферу, со спутниковыми программами, касающимися использования солнечной энергии.

3. Создание доступного всем банка данных для широкого использования учеными.

4. Определение и проведение необходимых синоптических измерений.

5. Использование как дистанционных приборов, так и измерений *in situ*. Последние особенно нужны для изучения множества параметров в области стратосферы—мезосферы.

6. Проведение взаимных сопоставлений и калибровки экспериментальных приборов.

7. Начать работы следует безотлагательно и довести их до высокого уровня в течение трех лет. Это существенно, чтобы воспользоваться приближающимся максимумом солнечной активности и определить антропогенные атмосферные изменения в рамках запланированных на будущее экспериментов.

6. РОЛЬ МАЛЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ

Председатель: Ч. Ф. Секрист мл. (электротехнический ф-т Иллинойского университета, Урбана, США).

С ролью малых составляющих в проблеме «Солнце—погода—климат» связаны по крайней мере два аспекта, а именно: 1) каким образом на них влияет изменение солнечного крайнего ультрафиолетового и корпускулярного излучений и 2) каким

образом изменения малых составляющих сказываются на тропосферных погоде и климате?

Малые составляющие являются неотъемлемой частью атмосферной радиационно-химически-динамической системы. На первом месте среди них стоит озон, поскольку он поглощает ультрафиолетовое излучение, которое управляет динамикой стратосферы и определяет ее температуру. NO_2 — другая стратосферная составляющая, играющая большую роль в радиационном балансе вследствие поглощения ею видимого света и близкого ультрафиолетового излучения. Значение таких малых составляющих, как CO_2 , H_2O , O_3 и др., связано с поглощением и излучением ими инфракрасной радиации, что приводит к существованию парникового эффекта и нагреву подстилающей поверхности.

Изменения малых составляющих могут влиять на погоду и климат разными путями. Некоторые из них влияют на общий радиационный баланс, другие — на динамические свойства атмосферы. В первую категорию можно отнести изменения общего содержания или высотного распределения O_3 . Как показывают вычисления, и то и другое изменяет температуру всей земной поверхности. Изменения NO_2 могут также влиять на радиационный баланс, поскольку способны изменять стратосферный сток таких малых составляющих, как N_2O . Динамические изменения могут вызываться изменениями структуры ветра в стратосфере, которые влияют и на характер распространения тропосферных планетарных волн. Предполагаются также изменения в процессах взаимодействия тропосферы и стратосферы.

В следующих разделах мы рассмотрим ряд конкретных вопросов, проиллюстрируем некоторые возможные связи в цепи физических процессов между Солнцем и тропосферными погодой и климатом, а также рекомендуем различные типы исследований с помощью упрощенных механистических моделей и некоторые критические эксперименты по проверке этих моделей.

6.1. Главные вопросы

Предполагая, что солнечное влияние на погоду и климат существует, необходимо выбрать стратегию для выявления и исследования возможных физических механизмов, которые связывают погоду и климат в тропосфере с изменчивостью Солнца. Одна стратегия включает постановку нескольких четко определенных вопросов. Приведем примеры таких вопросов.

1) Влияет ли высыпание частиц в высоких широтах на термическую структуру и циркуляцию стратосферы и тропосферы?

2) Какова относительная роль малых нейтральных составляющих, ионов и аэрозолей в средней атмосфере в осуществлении связей Солнца с погодой и климатом?

3) Приводят ли изменения крайнего солнечного УФ-излучения к существенным изменениям концентрации O_3 в средней атмосфере? Если да, то как изменения O_3 связаны с изменениями тропосферных погоды и климата?

4) Имеется ли тесная связь между ММП и высокоширотным выпадением энергичных частиц?

5) Какова относительная роль солнечного излучения (электромагнитного и корпускулярного), галактических космических лучей и выпадающих энергичных частиц для солнечно-атмосферных связей?

6) Какова зависимость между полярными сияниями, магнитными суббурями, высокоширотным выпадением частиц и солнечно-атмосферными связями?

7) Связана ли диссипация энергии (нагрев) выпадающих в высоких широтах (вблизи аврорального овала) энергичных частиц с высокой корреляцией между прохождением границ секторов ММП и индексом завихренности атмосферы зимой в высоких широтах?

8) Играют ли атмосферные волны (гравитационные, планетарные и т. д.) какую-либо роль в солнечно-атмосферных связях?

9) Как влияет распределение температуры в средней атмосфере на распространение планетарных волн?

10) Какова роль планетарных волн и полярных ночных струйных течений в солнечно-атмосферных связях?

11) Как влияют планетарные волны на тропосферную циркуляцию и погоду?

12) Каково влияние солнечной активности (вспышки, потоки энергичных частиц и т. д.) на состав, распределение температуры и динамику средней атмосферы?

13) Каково влияние геомагнитной активности на состав, распределение температуры и динамику средней атмосферы?

14) Какова реакция тропосферы на изменения состава, распределения температуры и динамики средней атмосферы?

15) Каково влияние солнечной активности, геомагнитных бурь и полярных сияний на интенсивность и положение полярного ночного струйного течения?

16) Насколько состав, распределение температуры и динамика средней атмосферы чувствительны к изменениям солнечного излучения, выпадения энергичных частиц, полярных сияний и геомагнитной активности?

17) Как отзывается тропосферная погода на изменение положения и интенсивности полярного ночного струйного течения?

18) Какова роль тормозного рентгеновского излучения, возникающего при высыпании энергичных электронов, в солнечно-атмосферных связях?

Поставленные выше вопросы нуждаются в создании ряда сценариев, исследовании «чувствительности» механистических моделей и постановке экспериментов для проверки постулируемых физических механизмов. Однако, следуя намеченному пути, мы должны помнить все то, что было установлено о физических механизмах связей Солнце—погода—климат с помощью корреляционного анализа.

6.2. Возможные механизмы

Можно предложить ряд возможных физических механизмов солнечно-земных связей. Следует подчеркнуть, что атмосферная реакция энергетически гораздо больше, чем малый внешний сигнал. Возможные механизмы включают:

1. Эффект прямого нагрева, связанный с поглощением изменяющихся компонент солнечного спектра. Простое увеличение уровня энергии могут вызвать эффекты распространения энергии в верхней стратосфере; возможным источником может быть полоса 0,3 мкм O_3 .

2. Модуляцию стационарных волн, возникающих под влиянием орографии и температурных аномалий, путем изменения характеристик отражения и поглощения верхней стратосферы (вероятно, через вариации O_3). Поскольку стационарные волны являются видом резонансных волн, можно ожидать значительный эффект на поверхности.

3. Непрямое физическое воздействие, из которого наиболее вероятным кажется изменение облачного покрова типа *cirrus*, связанное с потоком солнечных частиц и ионизацией. Результатом этого могут быть значительные радиационные эффекты.

4. Модуляцию начальных возмущений, которые вызывают бароклинную неустойчивость и начальное развитие перемещающихся волн, связанных с погодными системами. Хотя естественные флуктуации погоды кажутся большими по сравнению с солнечно-обусловленными, это не является справедливым для обусловленных Солнцем крупномасштабных возмущений.

6.3. Солнечная изменчивость и малые составляющие

Рис. 1 схематически иллюстрирует несколько возможных механизмов (включающих малые составляющие атмосферы), посредством которых солнечные или другие внеземные про-

цессы могут влиять на тропосферные погоду и климат. Принимая гипотезу, по которой малые составляющие атмосферы

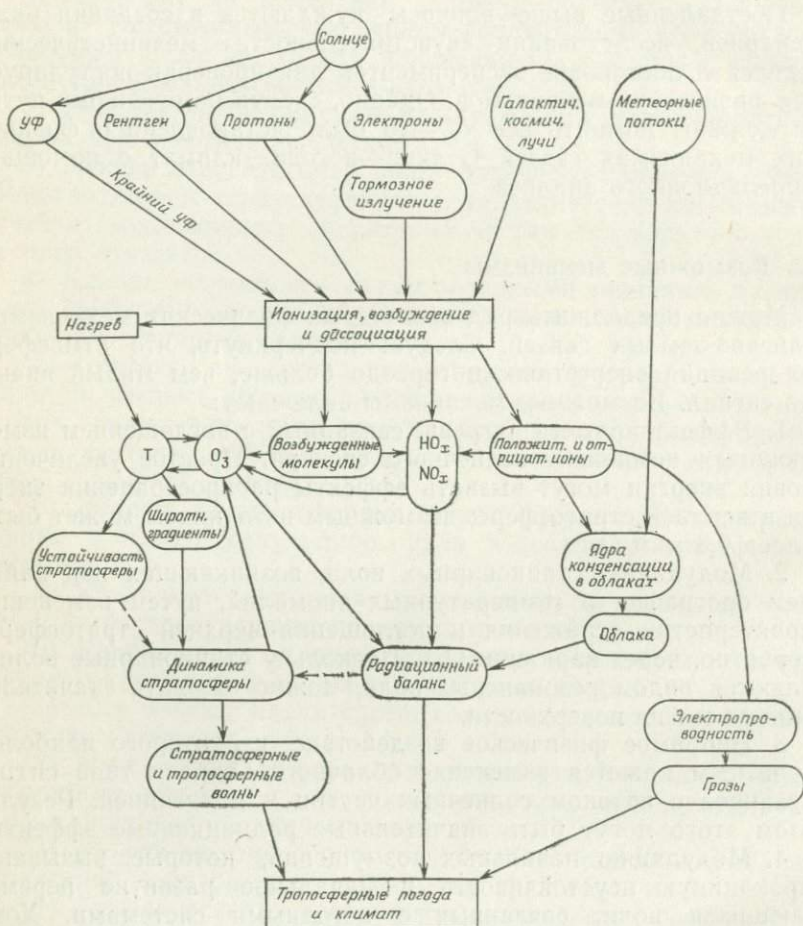


Рис. 1. Диаграмма, иллюстрирующая некоторые возможные механизмы солнечного воздействия на тропосферные погоду и климат.

могут воздействовать на погоду и климат в тропосфере, следует выяснить, какими путями изменения солнечного излучения могут влиять на малые составляющие. Ниже рассматриваются некоторые возможные агенты.

1) *Протоны*. Большая протонная вспышка на Солнце в августе 1972 г. привела к уменьшению O_3 в столбе выше уровня

на 4 мбар. Это уменьшение O_3 в общем согласуется с теорией, в которой используются каталитические реакции с участием молекул NO_x , производимых высокоэнергичными протонами (~ 100 МэВ), проникающими на стратосферные уровни. Эти большие протонные вспышки не прямо коррелируют с общим изменением солнечной активности, а наблюдаются преимущественно на нисходящей ветви цикла, встречаясь иногда и на восходящей ветви. Менее значительные протонные выбросы, происходящие гораздо чаще, в общем коррелируются с солнечной активностью, но частицы обычно проникают лишь на мезосферные уровни, где характер влияния их на O_3 не определен.

2) *Галактические космические лучи.* Вариации галактических космических лучей находятся в противофазе с солнечной активностью. Высокоэнергичные частицы проникают в нижнюю стратосферу и верхнюю тропосферу, вызывая ионизацию, которая ведет, помимо других воздействий, к образованию NO_x . Имеющиеся теории предсказывают увеличение в столбе количества O_3 , обязанное росту NO_x ниже 20 км, вследствие чего отмечается связь, не совпадающая с фазой цикла солнечной активности. Вычисления амплитуды показывают, что эффект очень мал.

3) *Ультрафиолетовое излучение.* Данных о вариациях УФ-излучения в течение цикла солнечной активности и в связи с вращением Солнца еще недостаточно, и они довольно противоречивы. Интенсивность крайнего ультрафиолета (ниже 0,1 мкм) изменяется вдвое в течение солнечного цикла. Это влияет главным образом на термосферу. Излучение в области спектра от 0,2 до 0,3 мкм варьирует меньше, возможно всего на 10—20%. Эти вариации, по-видимому, происходят в фазе с солнечным циклом и, согласно расчетам, должны обеспечить синфазные вариации содержания O_3 в столбе атмосферы на несколько процентов и большие синфазные вариации O_3 в верхней стратосфере. Вычисления также показывают сопутствующее уменьшение температуры в области стратопаузы.

4) *Рентгеновское излучение, релятивистские электроны и другие излучения, вызванные вспышками.* Немного сделано по выявлению влияния вспышек на малые составляющие. Поскольку образование NO_x является одним из наиболее важных эффектов ионизации малых составляющих, суммарный результат воздействия на концентрацию озона невозможно определить без численной модели. Инжекция NO_x в верхнюю стратосферу, как предполагается, ведет к уменьшению O_3 , тогда как инжекция NO_x в нижней стратосфере — к увеличению O_3 . Следовательно, общее воздействие является комбинацией эффектов противоположного знака.

6.4. Примеры сценариев

1) *Сценарий А: солнечное ультрафиолетовое излучение.* Недавно Кэллис и Нили [3] описали вероятный и, по-видимому, важный физический механизм, который может связывать 11-летний солнечный цикл с химическим и динамическим состоянием стратосферы. По существу, их исследование показало, что солнечная изменчивость в диапазоне 0,17—0,3 мкм может представлять собой физический агент, способный связать солнечный цикл с общей циркуляцией атмосферы. В основном Кэллис и Нили показали, что концентрации малых нейтральных составляющих и распределение температуры могут значительно изменяться на высотах 20—50 км. В частности они обнаружили, что стратосферные концентрации O_3 , $O(^3P)$, $O(^1D)$, N_2O , NO и OH весьма чувствительны к вариациям солнечного ультрафиолетового излучения в области длин волн меньше 0,3 мкм. Кроме того, оказалось, что температура на высотах более 30 км чувствительна к вариациям потока солнечного излучения главным образом в области длин волн короче 0,21 мкм.

Если вариации в солнечном ультрафиолетовом излучении заметно влияют на содержание O_3 и температуру, значит могут происходить изменения профиля ветра и статической устойчивости стратосферы. Следовательно, можно ожидать соответствующих изменений в меридиональном переносе тепла планетарными волнами в тропосфере [2]. Поскольку эти волны отвечают за большую часть направленного к полюсу потока тепла зимой в средних широтах северного полушария, представляется вероятным, что посредством некоторого динамического механизма вариации солнечного УФ-излучения и (или) относительного содержания O_3 в средней атмосфере могут вести к колебаниям тропосферных погоды и климата.

Названный сценарий подкрепляется моделью Эвери и Геллера [1], которые определили чувствительность планетарных волн к изменениям зональных ветров и статической устойчивости. Согласно их расчетам, структура волн в тропосфере и стратосфере чувствительна к колебаниям интенсивности полярного ночного струйного течения. Поскольку полярное течение — прямой результат меридионального температурного градиента в стратосфере, возможно, что изменения концентрации O_3 влияют на интенсивность и положение этого течения. Следовательно, они могут влиять на структуру стратосферных ветров, которые в свою очередь способны изменять структуру планетарных волн в стратосфере и тропосфере. Таким образом, различная структура волн могла бы влиять на количество дви-

жения и перенос тепла в тропосфере, как это предполагает Бэйтс [2].

2) *Сценарий Б: энергичные электроны.* Поток энергичных электронов, высыпаящихся из внешнего радиационного пояса магнитосферы, может быть причиной уменьшения концентрации O_3 на высотах 50—70 км.

Существующий уже сейчас значительный объем данных о высыпании энергичных электронов из внешнего пояса будет увеличиваться благодаря намечаемым запускам низкоперигейных спутников на полярные орбиты. По этим данным можно вычислить ионизацию на высотах 50—70 км и получить оценки уменьшения O_3 на основе суточных значений. Наблюдаемые флуктуации как интенсивности, так и широтного распределения источника ионизации связаны с влиянием геомагнитной и солнечной активности. Отсюда можно было бы ожидать вариаций концентрации O_3 в мезосфере в той же широтной области. Варьирует ли стратосферный озон или температура благодаря этому механизму, еще следует установить, но соответствующие измерения O_3 могли бы дать основания для вывода, может ли процесс связать солнечную изменчивость и процессы в нижней атмосфере.

3) *Сценарий В: энергичные частицы.* Исследования Швен-тека [6], а также Фритца и Ангелля [4] позволяют предположить, что не солнечное ультрафиолетовое излучение, а энергичные частицы могут быть ответственны за наблюдаемые вариации температуры на высоте 35 км над Берлином в течение зимних месяцев в солнечном цикле. Предполагаемая цепь физических зависимостей, объясняющих эту связь, такова:

— Высыпание энергичных частиц в высоких широтах вызывает полярные сияния и нагрев ионосферы на ~ 200 К.

— Полярные сияния наблюдаются в узкой широтной зоне (60 — 65°); с ними может быть связана эмиссия линии $4,3$ мкм ионов NO^+ . Эта длина волны лежит внутри полосы поглощения CO_2 , и в результате данная эмиссия может нагревать область высот 30—70 км примерно на 2 К.

— Изменение температуры на 2 К в узкой широтной зоне может существенно ослаблять скорость западного ветра вблизи широты 60° на высоте 70 км.

— Теория планетарных волн указывает, что ослабление зонального ветра в средней атмосфере приводит к увеличению направленного вверх потока энергии волн из тропосферы в стратосферу. Это может вызывать полярные стратосферные возмущения зимой.

— На тропосферную температуру и циркуляцию влияют изменения амплитуды и фазы планетарных волн.

6.5. Рекомендации

Поскольку существует несколько физико-химических процессов, относящихся к проблеме влияния солнечной активности на малые составляющие, имеется настоятельная необходимость в проведении новых исследований по проблеме влияния солнечной изменчивости на стратосферу. Например, больше внимания следует уделить исследованиям химии не только $O(^1D)$, но и других возбужденных нейтральных составляющих; состава и химии ионов; формирования ядер конденсации в средней атмосфере. Эти исследования могут сделать вклад в изучение характера воздействия солнечной изменчивости на верхнюю атмосферу. Дадим несколько специальных рекомендаций для будущих работ.

1) *Динамические и радиационные механизмы.* Блок-диаграмма на рис. 1 мало говорит о связи между стратосферными изменениями и тропосферными погодой и климатом. Необходимо более подробное рассмотрение. Требуются детальные исследования динамики взаимодействия между тропосферой и стратосферой. Существует общее согласие, что если малые атмосферные составляющие играют определенную роль в создании солнечно-атмосферных эффектов, то необходимо динамическое или радиационное взаимодействие стратосферы и тропосферы. Рассматривая специально вопрос о динамическом взаимодействии, очень важно знать амплитуду, пространственные и временные характеристики этих возмущений, чтобы понять, как они могли бы повлиять на распространение волн или характеристики общей циркуляции средней атмосферы. В свою очередь специалисты по динамике атмосферы должны определить чувствительность средней атмосферы к термодинамическим изменениям. Если в качестве возможного механизма рассматривать радиационное взаимодействие, то необходимо знать источник радиационных изменений, временную шкалу, на протяжении которой они наблюдаются, и на какие стороны энергетики тропосферы они непосредственно влияют.

2) *Исследования на моделях.* Большая часть существующих динамических моделей атмосферы не годится для оценки химических и температурных изменений (импульсных и долгопериодных). В них не учтены некоторые процессы, которые могли бы повлиять на результаты (например, незнание химии мезосферы и т. д.). Этот недостаток должен быть скорректирован в соответствии с существующим уровнем знаний и теорией. Можно ввести некоторые упрощения при переходе от модели 1-D к 3-D, т. е. все вычисленные по модели 1-D эффекты выразить через

изменения O_3 , стратосферных температур и условий стабильности тропопаузы.

3) *Проверка сценариев.*

а) Модели 1-D (и, по-видимому, 2-D) следует использовать для оценки возможного солнечного влияния на распределение отдельных компонент и температуры путем оценки химических и связанных или не связанных с ними температурных эффектов. Основными исследуемыми параметрами будут амплитуда и время жизни возмущений различных составляющих и температуры. Эти модельные исследования тогда наметят пути для вычислений по модели 2-D и 3-D, а также выявят чувствительные к внешнему воздействию возмущения состава и температуры в зависимости от высоты для будущих экспериментальных программ.

б) С помощью вычислений по моделям 2-D можно оценить распределение по широтам некоторых химических и температурных эффектов. Это даст предварительные рекомендации для составления программ пространственных измерений, результаты которых привели бы к подтверждению или отверганию гипотетических явлений.

в) Вычисления по модели 3-D должны проводиться на основе наиболее вероятных данных о стратосферных возмущениях, следующих из теории и расчетов по моделям 1-D и 2-D. Поскольку эти вычисления будут очень дорогостоящими, эксперименты должны быть в высшей мере обоснованы и выбраны для той модели, которая характеризует наиболее надежное взаимодействие. Вычисления следует направить на выяснение короткопериодной динамической реакции общей циркуляции на изменения стратосферного O_3 , температуры и условий статической устойчивости тропопаузы (взяты по отдельности и в различных комбинациях). Недавние и будущие запуски спутников обеспечат данные для учета реальных начальных условий. Результаты модельных расчетов нужно сравнивать с наблюдениями изменений VAI, приземного давления и т. д.

4) *Общая перспектива.* Исследованию причинных механизмов, которые создают множество корреляционных связей в области солнечно-атмосферных эффектов, чрезвычайно помогло бы получение планетарной картины, которую могут дать спутниковые наблюдения. Кроме того, еще мало известно об эффективности связей тропосферных явлений с солнечной активностью. Наконец, представляется очевидным, что значительный вклад в наше понимание причинных механизмов солнечно-атмосферных явлений могли бы внести спутниковые наблюдения средней атмосферы в течение длительных периодов.

Для средней атмосферы следовало бы рассмотреть использование данных, которые были получены с помощью спутников

«Нимбус-4, 5, 6», а также «Нимбус Г». В будущем на спутнике по исследованию верхней атмосферы (UARS) и в космической лаборатории «Спейслэб» могли бы выполняться некоторые эксперименты, которые особенно пригодились бы для исследования этих причинных механизмов. Измерения малых составляющих в средней атмосфере представляют особую ценность, так как, используя данные о соответствующих изменениях температуры или концентрации малых составляющих, можно будет сделать выводы о солнечно-земных взаимодействиях. Малые составляющие типа O_3 могут играть роль лагранжевых индикаторов атмосферных движений, в частности вызванных солнечной активностью. В начале 80-х годов спутники серии «Тайрос-Н» будут измерять важные солнечные и среднеатмосферные параметры — концентрацию O_3 , распределение температуры, а также полное и ультрафиолетовое солнечное излучение.

Описанные подходы помогут устранить множество слабых сторон прежних исследований солнечно-атмосферных эффектов, когда было затруднительно получить корреляционные связи на глобальной основе с достаточно хорошим разрешением.

Литература

1. *Avery S. K., Geller M. A.* Effects of middle atmosphere winds on planetary waves in the troposphere. Submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 1978.
2. *Bates R.* Dynamics of stationary ultra-long waves in middle latitudes. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **103**, 397, 1977.
3. *Callis L. B., Nealy J. E.* Solar UV variability and its effect on stratospheric thermal structure and trace constituents. *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 249, 1978.
4. *Fritz S., Angell J. K.* Temperature and wind variation in the tropical upper stratosphere and lower mesosphere during a sunspot cycle. *J. Geophys. Res.*, **81**, 1051, 1976.
5. *Green S. A.* An assessment of possible mechanisms for Sun—weather relationships. Presented at the International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, Innsbruck, Austria, June 1978.
6. *Schwenck H.* The sunspot cycle 1958/70 in ionospheric absorption and stratospheric temperature. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 1839, 1971.

РЕЗОЛЮЦИИ СИМПОЗИУМА И РАБОЧЕГО СОВЕЩАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПОГОДУ И КЛИМАТ

Университет штата Огайо, 24—28 июля 1978 г. (передано научным учреждениям и другим заинтересованным органам)

В пятницу 28 июля 1978 г. участники симпозиума и рабочего совещания встретились на общем заседании, чтобы заслушать сообщения рабочих групп и рассмотреть важнейшие ре-

зультаты обсуждений, относящихся к изучению солнечно-погодных и солнечно-климатических связей. В результате ассамблея единодушно приняла две приведенные ниже резолюции, адресованные Международному совету научных союзов и другим соответствующим научным учреждениям.

I. О СОЛНЕЧНО-ПОГОДНЫХ И СОЛНЕЧНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

КОНСТАТИРУЮЩАЯ ЧАСТЬ

Симпозиум по влиянию солнечной активности на погоду и климат был проведен в откровенной атмосфере научного обсуждения. Он состоял из заказных докладов и научных сообщений, обширной дискуссии и заседаний рабочих групп, которые сформулировали планы и рекомендации для будущих исследований. Основные темы, рассмотренные на симпозиуме, включают: 1) обзор солнечных явлений и их влияний на земную атмосферу; 2) исследования корреляций; 3) экспериментальные данные и 4) физические процессы. Рабочие группы были разделены по следующим темам: 1) метеорологические и климатические корреляционные исследования; 2) солнечные воздействия на общую циркуляцию и климатические модели; 3) солнечные воздействия на малые составляющие атмосферы; 4) динамика Солнечной системы; 5) электрическое поле и взаимодействие верхней и нижней атмосферы; 6) экспериментальные методы изучения солнечно-атмосферных связей и 7) внеземные воздействия.

РЕЗОЛЮЦИЯ

Участники симпозиума по влиянию солнечной активности на погоду и климат представили и обсудили существующие и предлагаемые механизмы, способные объяснить влияние солнечной изменчивости на погоду и климат. Предмет обсуждения связан с многими аспектами человеческой деятельности. Труды симпозиума будут опубликованы в начале 1979 г.

Участники симпозиума хотели бы привлечь внимание международных научных учреждений, особенно Международного совета научных союзов и Международной метеорологической организации, к трудам конференции. Участники убеждены, что дальнейшие исследования должны проводиться путем международной координации с установлением каналов распределения соответствующих данных и их анализов, а также определением типов измерений, которые следует провести в будущем.

II. О РЯДАХ СОЛНЕЧНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

КОНСТАТИРУЮЩАЯ ЧАСТЬ

Длинные синоптические ряды солнечно-геофизических данных часто обязаны своим существованием отдельным лицам, которые затрачивали огромные усилия в течение многих лет, чтобы поддерживать непрерывность, последовательность и хорошее качество рядов наблюдений. Вот примеры таких рядов данных:

1) цюрихские числа пятен, начатые Вольфом и позднее продолженные Вальдмайером (с 1818 г.);

2) кальциевые флоккулы, наблюдаемые на обсерватории Мак-Мас-Халберт (составленные Додсон-Принс с 1942 г.);

3) поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см, измеряемый на станции Оттава (ряды составлены Ковингтоном с 1947 г.), и

4) *aa*-индекс геомагнитной активности (ряды составлены Майо с 1868 г.).

Мы привели примеры наземных синоптических рядов данных, которые очень ценны своей непрерывностью, последовательностью и высоким качеством. Эти ряды широко используются и доступны для исследователей благодаря ответственному отношению лиц, которые боролись за их сохранение. Эти люди были глубоко преданы делу продолжения и сохранения данных, часто невзирая на большие трудности. Многие из них теперь уже этим не занимаются. На симпозиуме и рабочем совещании задавалось много вопросов о судьбе подробных синоптических рядов данных. Поскольку многие участники симпозиума используют один или более из этих индексов как фундаментальные данные в своих исследованиях, они законно обеспокоены, как бы не потерять эти жизненно важные инструменты для исследования солнечно-земных связей.

РЕЗОЛЮЦИЯ

Участники симпозиума по влиянию солнечной активности на погоду и климат установили, что судьба определенных синоптических рядов солнечно-геофизических данных, необходимых исследователям для их работы и перечисленных выше, может оказаться в опасности в связи с уходом их главных апологетов.

Ясно, что использование этих данных в солнечно-погодных и солнечно-климатических исследованиях чрезвычайно важно.

Непрерывность и высокое качество этих данных и индексов требуют особого внимания со стороны отдельных лиц, а не институтов или агентств; проблема будет решена, если удастся

найти новых энтузиастов сохранения синоптических рядов данных и оказывать постоянную поддержку их работе.

Необходимо сосредоточить внимание на этой проблеме на самом высоком уровне международного научного сотрудничества и призвать агентства и институты оказывать необходимую финансовую поддержку для продолжения этих рядов данных.

Результаты исследований, связанных с использованием указанных рядов данных, будут нужны всему человечеству независимо от национальных и идеологических различий.

Поэтому было решено, что

Международный совет научных союзов и его постоянные представительства и национальные научные организации позаботятся о судьбе этих синоптических рядов данных и индексов, которые жизненно важны для исследования влияний Солнца на погоду и сделают все необходимое для обеспечения их непрерывности, последовательности и высокого качества.

Представлена на рассмотрение сопредседателями симпозиума и рабочего совещания по влиянию солнечной активности на погоду и климат:

Томасом А. Селигой, руководителем Атмосферной научной программы, Университет штата Огайо;

Билли М. Мак-Кормаком, Исследовательская лаборатория Локхид, Пало-Альто.

О СВЯЗИ ПОГОДЫ И КЛИМАТА С СОЛНЕЧНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ (ВВОДНЫЙ ОБЗОР)

В. О. Робертс

Дан обзор некоторых наиболее надежно установленных эмпирическим путем зависимостей между погодой на Земле и солнечной активностью, а также высказаны предположения о том, как эти зависимости указывают на некоторые эффекты и параметры атмосферы, требующие более интенсивных теоретических исследований и наблюдений. Вопрос о том, есть ли в действительности существенная связь между Солнцем и погодой, характеризующаяся малыми или большими масштабами времени, имеет важное теоретическое и практическое значение. Согласно некоторым данным, точность краткосрочных прогнозов погоды ухудшается в те же самые периоды, когда обнаруживаются кратковременные отклики на прохождение секторных границ межпланетного магнитного поля и другие солнечно-погодные эффекты.

1. «ЭНТУЗИАСТЫ ГЕЛИОГЕОФИЗИКИ»

Мне очень приятно представить здесь вводный обзор, поскольку бóльшая часть моей профессиональной деятельности была посвящена исследованию влияния изменяющейся солнечной активности на погоду. Этот обзор содержит результаты работ очень многих моих друзей и коллег, которые внесли за многие годы заметный вклад в развитие данного вопроса. Мы вместе видели, как развивалась эта область знаний — от скромных начинаний до того момента, когда стало возможным провести такой большой научный симпозиум с участием представителей из многих стран мира. Мы рады и тому, что здесь присутствуют несколько скептиков, таких, как Б. Питток, который вторит предостережениям А. Монина против «гелиогеофизического энтузиазма».

Было время, когда почти все считали, что исследователи связей между Солнцем и погодой лишь с успехом делали то, что Монин называл самовнушением и бессознательным манипулированием данными. Сейчас ситуация несколько изменилась. Не все считают, что мы являемся жертвами самовнушения.

И я надеюсь, что те, кто нас критикует, будут работать добросовестно и упорно и помогут нам избежать заблуждений при анализе и интерпретации данных, поскольку в нашей работе есть много возможностей допустить ошибку, а никто не хочет тратить время на то, чтобы идти ложным путем.

Природа обладает той способностью, что она необычайно сложна, а взаимодействия в ней нелинейны. Именно природа в состоянии сделать тщетными надежды Монина на более простые причинные связи. Монин считал, что для метеорологии было бы трагедией, если бы солнечная активность действительно играла существенную роль, так как в этом случае нам пришлось бы наряду с погодой прогнозировать и состояние Солнца. Однако может оказаться, что солнечная активность действительно существенна и играет заметную роль. Наша задача, как я себе представляю, состоит в том, чтобы определить, каковы ее проявления, и разработать стратегию исследований, которые помогут заменить знанием умозрительные предположения. В конце концов в этом и состоит задача любой науки.

Позвольте мне теперь вернуться к моей скромной задаче в этом важном вопросе. Сначала я расскажу о важности исследований, посвященных поискам влияния (если оно есть) солнечной активности на погоду и климат. Затем, не пытаясь сделать исчерпывающий обзор всего вопроса, я представляю два-три наиболее ярких доказательства, скажу несколько слов об их важности и укажу, где, по моему мнению, следует искать поле деятельности для будущих исследований.

Прежде всего мне и, надеюсь, вам ясно, что проблемы погоды и климата касаются людей всего мира. От пампасов Аргентины до самых отдаленных уголков Сибири, от Восточной Африки до плоскогорий США люди пытливно всматриваются в небеса, отыскивая признаки изменения погоды и климата.

В окружающей человека природной среде найдется мало факторов, имеющих столь же большое значение для благополучия человечества, какое имеет постоянство погоды и климата. Однако, как мы знаем, погода и климат могут отклоняться от средних норм, и часто весьма значительно. Эти отклонения характеризуются самыми различными пространственными и временными масштабами. Существенно, что изменения погоды и климата представляют собой нормальное явление. Поэтому приспособление к ним составляет неотъемлемую часть жизненного процесса. Однако если эти изменения слишком велики, то, по выражению Тома Моуди, мэра Колумбуса (штат Огайо), они являются причиной конца человеческих начинаний.

2. ЗНАЧЕНИЕ ПОГОДЫ И КЛИМАТА

В социально-экономической сфере очень мало факторов, которые по своей важности для производства продуктов питания, ведения торговли и улучшения условий жизни могли бы превзойти погоду и климат. Урожай в Центральной Европе очень чувствителен к поступлению солнечного излучения, осадков и тепла и их распределению во времени. На высокогорных равнинах Мексики приток воды для орошения наиболее обилен в те периоды, когда ураганы помогают влажному воздуху преодолеть горы и пройти от Мексиканского залива на эти равнины. Объем воды для орошения сокращается, когда по каким-либо причинам ураганы минуют Мексиканский залив.

В Японии прекрасно развитая система железных дорог приходит в упадок в периоды проливных дождей. Даже в такой стране обильных осадков, как Индонезия, посевы риса страдают в периоды, когда интенсивность дождей ослабевает. Вероятно, наиболее серьезная зависимость от погоды наблюдается в обширных засушливых или полусушливых областях Земли. Эти области уже сейчас страдают от перенаселенности и ранимости почв и растительности. В засушливых районах доходы или потери определяются тем, увеличивается или уменьшается количество осадков. Во время усиления засух ускоряются потери плодородных почв и превращение их в пустыню.

Предсказание улучшения или ухудшения погоды занимало умы как ученых, так и неспециалистов с самого начала истории человечества. Государственные деятели, военные, коммерсанты, разбойники и даже мэры приспособливают свои планы и образ действий к условиям погоды и климата. Во всех частях света размещена сложная и дорогостоящая сеть станций наблюдения, с тем чтобы улучшить базу данных для прогноза и фундаментальных исследований. Взаимный обмен результатами исследований, как на этом симпозиуме, помогает лучше понять основные процессы и, в конечном счете, процессы, определяющие погоду и климат. Совещания, подобные нашему, являются одним из действенных средств международных связей и сотрудничества.

3. ПОСТЕПЕННОЕ РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В области долгосрочного прогноза метеорологических явлений, несмотря на все внимание, сосредоточенное в последние годы на этом вопросе, прогресс был умеренным. Достигнутый уровень мастерства прогнозирования таков, что при заблаговременности, превышающей несколько дней, качество прогноза

падает ниже того уровня, который ожидают от прогноза и на который надеются непосредственно заинтересованные в нем люди как в отдельных районах, так и во всем мире. Из официальных заявлений, например в конгрессе США, парламенте Великобритании и Верховном Совете СССР, ясно, что все эти правительственные органы готовы выделить средства для изучения данной проблемы в том случае, если есть реальная надежда на то, что лучшее понимание приведет к прогрессу в прогнозировании. Аналогичное отношение к этой проблеме существует в преобладающем большинстве развитых и развивающихся стран мира.

Однако, несмотря на столь высокую поддержку исследований в области прогноза погоды и климата, неясно (по крайней мере мне), насколько далеко мы можем продвинуться в искусстве прогнозирования. Я полагаю, что заблаговременность прогнозов, наиболее существенная для сферы земледелия и производства продуктов питания, составляет один или, возможно, два года. Мне представляется крайне сомнительным, что мы когда-либо сможем предсказывать с какой-либо степенью точности отклонения от средних величин количества осадков и температуры для конкретного района. Причина этого в том, что в случае, когда заблаговременность прогноза превышает пять-семь дней, мы уже не уверены, учитывается ли действие всех факторов, вызывающих так называемые «нормальные» флуктуации погоды.

Конечно, в нашей области есть серьезные исследователи, считающие, что прогнозирование с большой заблаговременностью (более одной-двух недель) всегда будет тщетным. Они полагают, что при такой заблаговременности система становится существенно непредсказуемой. Есть и другие исследователи, включая меня, которые считают, что существуют и могут быть открыты причинные механизмы, которые до сих пор не учитываются надлежащим образом. На наш взгляд, это дает нам надежду улучшить наше понимание процессов формирования погоды и, следовательно, наши возможности прогнозировать ее. Разумеется, есть ученые, занимающие промежуточные позиции.

4. ПОИСК СОЛНЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ И ОБУСЛОВЛИВАЮЩИХ ИХ МЕХАНИЗМОВ

Поскольку возможно обнаружение новых механизмов, исследования в области солнечно-погодных связей действительно важны. Рискну сказать, что у нас теперь имеются достаточно надежные свидетельства явного воздействия солнечной активности на тропосферу, которое оказывает влияние на погоду

с опережением в несколько дней, а на климат с опережением в сезоны, годы, десятилетия и даже больше.

Можно было бы предположить, что эффекты воздействия солнечной активности на погоду малы и, более того, замаскированы. Тем не менее они, по-видимому, вызывают заметные изменения погоды и соответствуют тому, что мы наблюдаем, хотя, согласно большинству теорий метеорологических процессов, наблюдать такие эффекты невозможно.

Я считаю, что этот факт имеет чрезвычайно большое теоретическое значение. Эффекты воздействия солнечной активности на погоду, если они действительно имеются (а я в это верю), указывают нам на существование чего-то такого, что мы до сих пор еще не включили в наши прогностические модели. Они указывают нам, что «не счесть алмазов в каменных пещерах» и что нам следовало бы собраться и выкопать их. Если бы нам удалось выявить происходящие в этих явлениях физические процессы, это имело бы огромное значение для улучшения традиционных методов прогнозирования. Это могло бы даже означать открытие перспективы искусственных крупномасштабных изменений погоды и климата со всеми заключающимися в данном вопросе «за» и «против». Действительно, если солнечная активность может влиять на погоду и при этом в верхнюю атмосферу поступают крайне малые порции энергии, то должен существовать некоторый спусковой механизм или иметься положительная обратная связь. Вполне возможно, что такой механизм может быть включен преднамеренно или случайно в результате человеческой деятельности. Со своей стороны я надеюсь, что такие силы нам недоступны.

Вознаграждением за усилия, затраченные на исследования влияния Солнца на погоду, как мне представляется, может быть надежда на то, что они приведут нас к пониманию некоторых важных, но не учитываемых в настоящее время факторов, влияющих на атмосферные процессы. Это может дать новые полезные практические результаты и наверняка привести к новым проблемам, как опасался Монин.

Даже при нынешнем невысоком уровне знаний имеются, как будет показано ниже, некоторые свидетельства того, что солнечная активность влияет на точность прогнозов, выполняемых в соответствии с установившейся практикой, — даже прогнозов с заблаговременностью 12 и 24 ч.

Теперь разрешите мне на минуту обратиться к перечислению, в некоторой степени имеющему субъективный характер, тех связей Солнца и погоды, которые в настоящее время заслуживают особого внимания. Мне они представляются не объясненными, но достаточно надежными указаниями на то, в каких направлениях следует проводить наши исследования в будущем.

В отношении каждого из эффектов мне хотелось бы выдвинуть на первый план лишь несколько ключевых моментов. Что касается всех их в целом, то основная проблема состоит в том, что изменение достигающего Земли потока энергии, возникающее за счет вариаций солнечной активности, имеет величину, пренебрежимо малую по сравнению с запасом энергии в стратосфере и тропосфере. Таким образом, здесь мы явно имеем

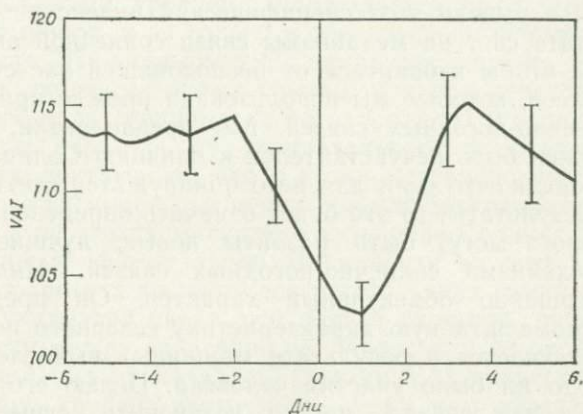


Рис. 1. Анализ методом наложенных эпох зависимости индекса VAI для северного полушария на уровне 300 мбар от числа дней, отсчитываемых от пересечения секторной границы ММП.

дело с некоторой сложной разновидностью положительной обратной связи или спусковым механизмом, высвобождающим энергию, запасенную в атмосфере. Мне представляется, что в настоящее время нам важно понять, как действуют подобные спусковые механизмы.

Первый пример, о котором мне хотелось бы сказать, относится к так называемому автографу индекса площади завихренности для полушария (VAI), возникающему после пересечения Землей секторной границы межпланетного магнитного поля. На рис. 1 [1] представлена суммарная площадь участков поверхности северного полушария, над которыми по измерениям была найдена сильная положительная завихренность, возникающая за счет существования циклонов. Этот индекс был предложен Р. Олсоном и мною. Он представляет собой суммарную площадь тех участков, расположенных к северу от широты 20° , для которых абсолютная завихренность превышает $20 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, плюс площадь участков, где завихренность превышает $24 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, VAI представляет собой

суммарную площадь участков с очень большой абсолютной циклонической завихренностью. На рисунке представлен результат анализа методом наложенных эпох. Ордината соответствует средней величине VAI для тех дней, когда секторная граница межпланетного магнитного поля проходит Землю, а также для дней до и после таких пересечений секторных границ. Данные взяты из результатов анализа завихренности примерно за 20 лет. Все они относятся к зимней половине года.

Олсон и я вывели этот специфический индекс не для того, чтобы пролить свет на механизмы связи солнечной активности и погоды, а чтобы избавиться от беспокоившей нас субъективности индексов, которые мы использовали прежде при исследовании солнечно-погодных связей. Мы предполагали, что этот индекс должен быть нечувствителен к влиянию Солнца, однако предчувствовали, что если для него обнаружатся статистически значимые результаты, то это будет означать определенный этап, после которого могут быть развиты новые, лучшие методы поисков механизма солнечно-погодных связей. Индекс VAI носит совершенно объективный характер. Он представляет собой крупномасштабную характеристику северного полушария Земли и получается в результате машинных вычислений без какого бы то ни было участия человека. Целью его введения было, как я уже сказал, просто установить, существует ли вообще влияние солнечной активности на погоду.

Первоначально Олсон и я использовали этот индекс для исследования взаимосвязи между большими внезапными геомагнитными возмущениями и завихренностью над северным полушарием. Несколько лет назад мы опубликовали результаты, подтверждающие существование этой взаимосвязи; оказалось, что они подтверждают также и результаты наших ранних исследований, проведенных с использованием более субъективных индексов.

После появления наших первых результатов Дж. Уилкокк высказал предположение, что было бы полезно рассмотреть также индексы VAI за дни, предшествующие прохождению секторной границы, и за дни после прохождения. Это привело к обнаружению нами характерного изменения, очень напоминающего то, которое изображено на рис. 1. Оно имеет характер провала на кривой, наступающего спустя сутки после прохождения секторной границы. Однако результат был встречен и с интересом, и с некоторым скептицизмом. Ведь мы, возможно, были жертвами самовнушения!

К счастью, я могу теперь сказать, что этот вывод был широко проверен другими исследователями, в частности Хайнсом и Хэйлви [1]. Совершенно очевидно, что их проверка была наиболее тщательной и изящной из всех; значения, представ-

ленные на рис. 1, практически не отличаются от полученных нами, а проверка на значимость была на более высоком уровне, чем у нас. На рис. 1 использованы значения, соответствующие зимней половине года. Как показано в других работах, эффект наиболее четко проявляется для поверхности уровня давления 300 мбар, но он хорошо заметен и для поверхности 500 мбар и может быть обнаружен также для большинства других рассмотренных нами уровней. Наблюдается он в значительном интервале широт, а не только в относительно небольшой полярной области. По-видимому, он одинаково хорошо проявляется для обоих типов секторных границ: как при переходе от положительного поля (направленного от Солнца) к отрицательному, так и при переходе от отрицательного к положительному. Результаты показывают, что к этому метеорологическому явлению, вероятно, имеет отношение именно межпланетное магнитное поле, а не электромагнитное излучение Солнца.

Описанный эффект проявляется почти во всех исследованных нами отрезках времени, соответствующих зимним условиям. Он ясно указывает на то, что нельзя отрицать существование зависимости между солнечной активностью и погодой, какой бы невероятной она ни казалась. Однако VAI представляет собой чрезвычайно грубый инструмент. Если нам удастся выявить скрытый механизм вариаций, видимых на рисунке, то должны обнаружиться гораздо лучшие параметры атмосферы, которые мы могли бы использовать для изучения того, что же вызывает данный эффект. Мне кажется, что это разумный довод, заставляющий интенсифицировать поиски конкретных механизмов для объяснения этого эффекта.

Мне представляется, что большинство будущих работ должно быть направлено на проверку конкретных механизмов. Я настоятельно советую переходить от индекса завихренности, среднего для полушария, к рассмотрению более значимых метеорологических параметров, как это уже начали делать Г. Уильямс, С. Бусинджер и другие. Теперь стоит внимательнее присмотреться к таким параметрам, как кинетическая энергия зональных движений, кинетическая энергия турбулентности и т. п. Следовало бы также обратиться к изучению отдельных географических регионов. Представляется весьма вероятным, что эффекты должны различаться над континентами и над океанами, поэтому усреднение по полушарию может привести к маскировке ключевых различий.

На рис. 2 представлены результаты исследования Даффи [2], работавшего с Уилкоксом и его коллегами. На нем индекс VAI показан в несколько ином виде, чем на рис. 1, где он был усреднен по всему северному полушарию. В этом случае Олсоном был дан индекс VAI, соответствующий каждой отдельной

области пониженного давления, движущейся к заливу Аляска с запада от долготы 180° . Он приписал индекс завихренности каждой из ячеек пониженного давления и следил за их пове-

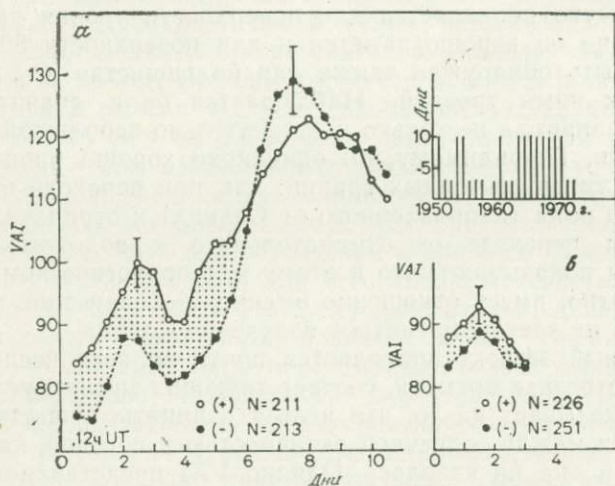


Рис. 2. Временной ход средней площади областей пониженного давления после пересечения областью меридиана 180° . Области пониженного давления разделены на «положительные» (светлые кружки), для которых при долготе области меньше 180° ММП было направлено от Солнца, и «отрицательные» (темные точки), для которых ММП направлено к Солнцу. VAI дан в единицах 10^4 км². *a* — временной ход в течение 10 дней. В течение первых 5 дней после прохождения меридиана 180° площадь «положительных» областей пониженного давления значительно превышает площадь «отрицательных». Вертикальные отрезки соответствуют среднеквадратичному отклонению. *б* — зимние сезоны, по которым имелись данные об областях пониженного давления за 10 дней и только за 3 дня. *в* — то же, что на рис. 2, *a*, но вычисления были выполнены для тех лет, когда имелись данные о площадях областей пониженного давления только за 3 дня. Площадь «положительных» областей снова больше, чем «отрицательных».

дением; этот индекс вычислялся через каждые 12 ч по мере перемещения ячейки в восточном направлении. За начало отсчета на графике принят первый день после обнаружения области низкого давления в районе залива Аляска. В последующие дни, указанные на оси абсцисс, эта область перемещалась на восток. Рис. 2 демонстрирует, что индекс VAI в среднем выше у областей пониженного давления, впервые замеченных в районе залива Аляска в те периоды времени, когда сектор межпланетного магнитного поля положителен (т. е. поле направлено от Солнца; ему соответствует на рисунке кривая с кружками). Области, для которых знак сектора был криво-

положным, имели в среднем меньшее значение VAI. Как и раньше, наблюдаемое явление относится к зимней половине года.

Этот результат статистически обоснован значительно меньше, чем на рис. 1. Однако его значение состоит в том, что он указывает на существование конкретного района (залив Аляска), где солнечно-погодный эффект проявляется особенно сильно — возможно, вследствие разности температур в зимний период между океаном и сушей. Вероятно, существенно и то, что рассмотренный район расположен на широте, которая в периоды большой авроральной активности близка к зоне полярных сияний. Более того, давно известно, что район залива Аляска зимой представляет собой место, где расположен чрезвычайно мощный источник циклонов. Мне кажется, что изучение отдельных районов (таких, как этот) при помощи точных методов (таких, как описанный выше) позволит нам подобрать ключи к механизмам взаимодействия. Я не буду больше ничего говорить об этом, поскольку ниже в этой книге приведены результаты Уилкокса, которые еще более определенно указывают на связь солнечно-погодных явлений с заливом Аляска. Я упомянул об этом эффекте в надежде, что он послужит примером того, на что в настоящее время надо обратить особое внимание.

Следующий вопрос, который я хочу кратко рассмотреть, касается гроз и атмосферного электричества. Я не собираюсь приводить здесь рисунки, относящиеся к данной теме, поскольку Рейтер и Марксон, являющиеся пионерами в этой области, сами опишут ряд новых результатов. Я хочу здесь лишь сказать, что, по моему мнению, исследование гроз и атмосферного электричества — наиболее многообещающее направление поисков механизмов взаимодействия, к которому следует обратиться в настоящее время. По-видимому, Марксон первый предположил, что секторные границы при их прохождении у Земли могут влиять на грозовую активность; такое влияние, возможно, оказывают также солнечные вспышки и другие явления на Солнце.

Исследования в этой области указывают на возможность существования физического механизма, который объяснил бы связь Солнца и погоды. Объяснение этой связи имеет общее значение, далеко выходящее за рамки исследований солнечно-погодных явлений, и могло бы найти применение в традиционной метеорологии и исследованиях климата, не имеющих отношения к солнечной активности. Такие исследования могли бы даже указать пути крупномасштабного искусственного изменения погоды. Но в настоящее время, насколько я понимаю, исследование атмосферного электричества может привести к появлению целого ряда новых, проверяемых опытным путем идей

о механизмах связи Солнца и погоды. Многие вопросы, рассматриваемые ниже в этой книге, связаны с возможностью систематического измерения потенциала ионосферы относительно Земли. Трудно переоценить важность надежных наблюдений этого параметра и изучения связи его с частотой гроз, солнечной активностью и поведением космических лучей. Несколько лет назад Ней предположил, что связь климата

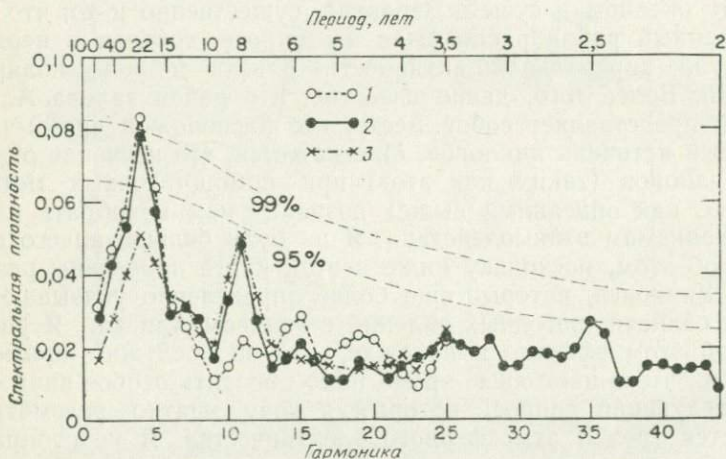


Рис. 3. Функция спектральной плотности для ряда, состоящего из региональных индексов засух. Доверительные границы (99 и 95 %) даны в предположении о наличии производящей функции марковского процесса первого порядка. 1 — все засухи (индекс Пальмера $PDSI \leq 1$), 2 — умеренные и сильные засухи ($PDSI \leq -2$), 3 — только сильные засухи $PDSI \leq -3$).

с циклом солнечной активности осуществляется за счет модуляции интенсивности космических лучей в течение цикла активности. Было бы также желательно связать изменения погоды с форбуш-понижениями потока космических лучей, возникающими после некоторых больших вспышек на Солнце.

Следующий вопрос, о котором я хотел бы упомянуть, — это связь засух на западе США с двойным (т. е. 22-летним) солнечным циклом. На рис. 3 представлены результаты Митчелла и др. [3]. На нем показана спектральная плотность регионального индекса засух, который они вывели исходя из данных о годовичных кольцах деревьев. Как можно видеть в левой части рисунка, спектральная плотность имеет большую и, по-видимому, значимую величину, соответствующую периоду примерно в 22 года. Региональный индекс засух представляет собой аналог индекса Пальмера для засух, основанный на данных

о годовых кольцах деревьев по западным районам США. Для периода времени, содержащего как данные о погоде, так и о кольцах деревьев, этот индекс хорошо коррелирует с индексом Пальмера, полученным исходя из метеорологической информации. Данные для построения спектра были взяты начиная приблизительно с 1700 г.

Значение этого результата, если он подтвердится, состоит в том, что он демонстрирует существование в течение длительного времени связанного с влиянием Солнца вынуждающего воздействия. Он указывает также на особые свойства конкретного географического района — западной части США, — на который воздействует такой крупный орографический барьер, как Скалистые горы. Результат этого исследования служит для нас призывом выяснить в наших солнечно-атмосферных исследованиях связь между климатическими явлениями, характеризующимися большими временными масштабами, и вариациями от дня ко дню.

На мой взгляд, пора уже постараться понять, как далеко нас может завести сопоставление взаимосвязи различного рода наблюдаемых корреляций между погодой и активностью Солнца. Являются ли они проявлением единой причинно-следственной связи? Или мы будем вынуждены, к своему сожалению, противостоять факту существования множества причин? Надеюсь, что последнее не произойдет!

5. ВЛИЯНИЕ НА ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Наконец, рассмотрим рис. 4, взятый из статьи Ларсена и Келли [4]. Этот рисунок иллюстрирует результаты анализа методом наложенных эпох, причем началу отсчета соответствует пересечение секторной границы, а по оси абсцисс нанесены дни до пересечения и после него. По оси ординат отложен средний коэффициент корреляции между предсказанными и реально наблюдавшимися значениями метеорологических параметров. В качестве предсказанных величин взяты прогнозы Национальной службы погоды с заблаговременностью 12 и 24 ч. Предсказанным параметром в этом исследовании был индекс VAI для полушария, полученный исходя из прогностических карт. Прежде было показано, что существует статистическая связь между индексом завихренности и пересечениями секторных границ межпланетного магнитного поля. Как можно видеть, на кривой имеется впадина, положение которой — около суток после пересечения секторной границы — очень близко к положению аналогичной впадины в нашей предыдущей работе. Значение этого результата состоит в том, что он указывает на существование некоторого связанного с секторной границей

источника энергии, оказывающего воздействие на тропосферу, но не учитываемого, в прогностической модели. Это, по-видимому, приводит к тому, что после прохождения секторной границы точность прогноза отклоняется от своего обычного значения. В результате возникает спад точности примерно от 85 до 68 %; как видно, он существует для заблаговременности

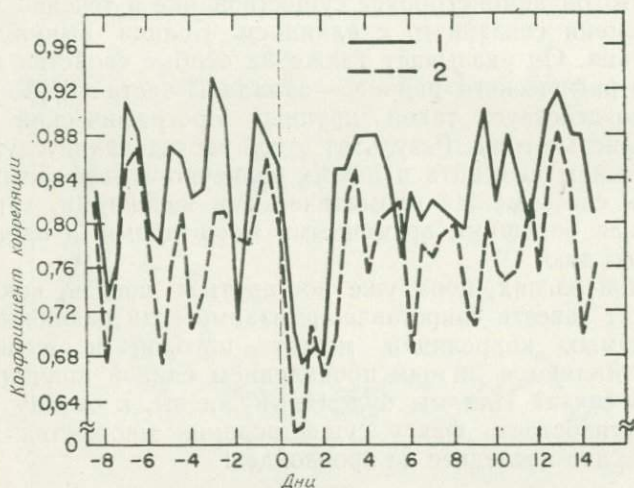


Рис. 4. Коэффициент корреляции между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями индекса VAI на уровне 500 мбар. 1 — заблаговременность прогноза 12 ч; 2 — заблаговременность 24 ч.

прогноза и 12 и 24 ч, хотя это именно те заблаговременности, для которых мы умеем прогнозировать наилучшим образом. Отмечу, что рис. 4 относится к исследованиям в течение очень небольшого интервала времени. Рисунок прямо-таки вызывает расширить этот интервал и предпринять дополнительные попытки обнаружить те участки на прогностических картах, из-за которых возникают основные ошибки.

6. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Позвольте мне в заключение сделать несколько замечаний. Прежде всего, я хочу поблагодарить Билли Мак-Кормака и Тома Селигу, Оргкомитет, а также многих других за проведение этого симпозиума и заседаний рабочих групп. Я уверен, что в будущем обязательно произойдет значительный сдвиг в сторону практического использования результатов наших исследо-

ваний — сдвиг, обусловленный изучением пока что скромных и поверхностных сведений о механизмах солнечно-погодных связей. Полагаю, что через 5—10 лет познание этих механизмов окажет практическую помощь повседневному прогнозированию. Если же я ошибаюсь, то по крайней мере надеюсь, мы навсегда похороним призраки самовнушения и бессознательной манипуляции данными, и они никогда не воскреснут, чтобы снова смущать нас.

Примерно через 25—30 лет население земного шара увеличится почти вдвое. Таким образом, мы будем жить в мире, которому потребуется не менее чем вдвое больше продуктов питания, чем производится сейчас. Эти продукты, вероятно, нужно будет производить на пахотных площадях, лишь на 50 % больших, чем возделывается в настоящее время. Как и сейчас, колебания погоды и климата почти наверняка будут источником наибольшей неопределенности в предсказании урожая и производстве сельскохозяйственных культур. В свете этих проблем ничто не может быть более привлекательным, чем попытки понять новые механизмы воздействия на погоду и климат.

Литература

1. Hines C. O., Halevy I. J. Atmos. Sci., 34, 382, 1977.
2. Duffy P. B., Wilcox J. M. EOS, 58, 1220, 1977.
3. Mitchell J. M., Stockton C. W., Meko M., 1978 (с 152 настоящей книги).
4. Larsen M. F., Kelley M. C. Geophys. Res. Lets., 4, 337, 1977.

ЗАГАДКА ЗАСУХИ БРОСАЕТ ВЫЗОВ НАУКЕ

Дж. Немнас

Понятие засухи, как правило, не имеет общепринятого количественного определения. В общих чертах засуха — это длительный период, характеризующийся отсутствием осадков, которое сильно сказывается на результатах хозяйственной деятельности. В таком понимании обычные сухие кратковременные периоды, когда в какой-то области выпадает мало дождей или их нет вообще, не рассматриваются, а важное значение имеет аномальное распределение осадков. В этой статье особый акцент будет сделан именно на этой стороне засухи, т. е. на отклонении количества осадков от климатической нормы (климатической аномалии осадков), поскольку именно эти аномалии связаны с крупномасштабной или общей циркуляцией.

Климатические флуктуации постоянно происходят на обширных площадях земли. Эти флуктуации могут продолжаться недели, месяцы, сезоны, годы, десятилетия, столетия и даже тысячелетия. Метеорологи считают эти флуктуации неотъемлемой частью общей картины погоды. Если в некоторой части страны в течение месяца или сезона не наблюдалось никаких существенных отклонений от нормальных погодных условий, то метеорологи будут, несомненно, изумлены. Короче говоря, ненормальность погоды в действительности является «нормальным» ее состоянием.

Метеорологические временные ряды, которые отражают эти явления, статистически когерентны. Когерентность существует не только между последующими днями, но, что также важно, эта когерентность обнаруживается в устойчивых повторениях похожих погодных состояний в течение определенного периода. Эти климатические флуктуации, особенно те из них, которые продолжаются от сезона до нескольких лет, всегда привлекали внимание как неспециалистов, так и метеорологов, потому что они имеют важное значение для различных отраслей американской экономики.

Последней климатической флуктуацией, известной широкой общественности, является засуха, которая поразила западное побережье в течение 1976—1977 гг. Большой части населения земного шара также известна засуха в Сахеле (присахарская

область), которая свирепствовала в течение первой половины 70-х годов.

Сначала следует подчеркнуть, что хотя полное понимание явления засухи и отсутствует, но ее диагностика развивается так, что зачастую имеется возможность предсказать с сезонной заблаговременностью ее начало и окончание в течение сезона или в его конце. Предсказание засухи с заблаговременностью в несколько лет относится к области искусства. Поэтому необходимо приложить все усилия для раскрытия существа этого явления и его предсказания. Это, конечно, относится и к влиянию Солнца на погоду. Настоящее сообщение в силу непонимания автором физических процессов и неопределенности темы раскроет только некоторые физические признаки, связанные с засухами, происходившими в различных районах и в разные времена года.

Начальным локальным признаком засухи является установление устойчивой стратификации в свободной атмосфере с относительно высокой температурой вверху, что способствует созданию нисходящих потоков со скоростью нескольких сотен метров в день. Это нисходящее движение вызывает адиабатический разогрев и уменьшение относительной влажности — факторов, которые препятствуют формированию облачности. Нисходящее движение в свою очередь обычно связано с горизонтальной дивергенцией воздуха и, следовательно, с антициклоническим искривлением изобар, особенно на среднетропосферных уровнях. Таким образом, засуха характеризуется повышенным давлением на верхних уровнях и антициклонической кривизной изобар, что почти повсеместно подтверждается в умеренных широтах. Это было справедливо для засухи на западном побережье в 1976—1977 гг., в СССР в 1972 г., в Англии в 1976 г., для юго-западной засухи 1952—1954 гг. и великой засухи «Даст Боул» 1930-х годов.

В этих антициклонах обычно наблюдаются спиральные нисходящие потоки сухого воздуха, которые смещаются на юг по отношению к преобладающим западным ветрам, в то время как потоки влажного воздуха усиливаются по периферии засушливой зоны. В летнее время над континентом наличие сухого воздуха почти всегда связано с чрезмерным разогревом, обусловленным частично нисходящим движением и более высокой инсоляцией в отсутствие облачности.

Центральной проблемой засухи является раскрытие механизмов, постоянно поддерживающих существование области высокого давления над площадью, пораженной засухой. Последние исследования показали, что, например, для равнин Соединенных Штатов наличие аномально высокого давления на верхних уровнях сопровождается такими же областями очень высокого дав-

ления над Атлантическим и Тихим океанами. Таким образом, устанавливается серия стоячих волн, где области нисходящего движения чередуются с областями восходящих потоков. Это хорошо известные волны Россби. Более поздние экспериментальные данные показывают, что аномальная картина поля ветра на больших высотах связана с аномальными температурами поверхности океанов. Аномальный разогрев или охлаждение воды может быть результатом нескольких синергических процессов, например радиационного разогрева, дрейфа Экмана (горизонтальная адвекция), волнения, теплообмена с вышележащим воздухом. Имеются указания на то, что аномалия океанической термоструктуры как бы «запоминается» и в свою очередь воздействует на атмосферу. Эта обратная связь океан—атмосфера действительно может способствовать засухе, потому что постоянная времени океана на порядок больше, чем у атмосферы.

В этой статье приведены примеры последних засух, которые могут подтвердить вышеизложенные гипотезы и показать уровень нашего непонимания физических процессов.

Кроме того, существуют статистические свидетельства, показывающие, что наличие увлажненности почв до и во время засухи может поддерживать ее и даже способствовать ее развитию. Возможно, эта связь реализуется посредством модуляции радиационного баланса или физических процессов в облаках, когда облачность образуется благодаря высокой концентрации ядер конденсации из пыли сухих почв, которые имеются в большом количестве во время засухи.

Поскольку засухи участились за последние несколько лет, то вполне возможно, что существуют некоторые другие внешние факторы, помимо температуры океана и влаги в почве. Это могут быть, например, нерегулярные вариации солнечной активности. Однако, по мнению автора, если эти факторы и существенны, то первоначальное состояние атмосферы и ее приземный слой должны модулировать солнечное влияние. Для выявления связи Солнце—засуха можно рекомендовать классифицировать засухи по районам, сезонам и крупномасштабным областям вне засухи. В этом направлении и ведут исследования некоторые статистики, которые хотят выяснить, какую роль играют солнечные воздействия на образование засух.

ПОТОК СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

У. К. Ливингстон

Дан обзор источников, спектральных свойств, энергетических характеристик и известных вариаций всех видов солнечного излучения: фотонов, частиц, а также полей. Рассмотрено экранирование линиями как возможный источник изменения спектральной плотности излучения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Поток солнечного излучения на Землю можно условно разделить так, как показано в табл. 1 [43]. Благодаря близости Солнца и настойчивости наблюдателей распределение потока фотонов известно к настоящему времени в пределах 14 порядков по длине волны и 27 порядков по величине потока энергии (рис. 1). Для наших поисков влияния Солнца на погоду и климат требуется, по крайней мере на первом этапе, рассмотрение всех форм солнечного излучения. Такая попытка и будет здесь предпринята. К счастью, некоторая определенная очередность действий представляется очевидной. Основная часть энергии содержится в видимой и ближней инфракрасной областях, и наша задача — отыскать малые изменения (в пределах 1 %) большой величины. При этом мы должны представлять, что изменение интенсивности или перераспределение энергии по спектру может происходить без изменения S , полного выхода энергии. Такие каналы ухода энергии, как, например, факельные площадки, или энергетические «тупики», солнечные пятна или экранирование линиями спектра, могут в принципе изменять «планковское» распределение по энергии, но для других длин волн (с тем чтобы получить ощутимое изменение солнечной постоянной) нам следует искать большие относительные изменения меньших величин. Известной областью, где существуют такие изменения, является крайнее ультрафиолетовое излучение. Частицы и изменяющиеся магнитные поля, переносимые солнечным ветром, представляют другую важную область. К счастью,

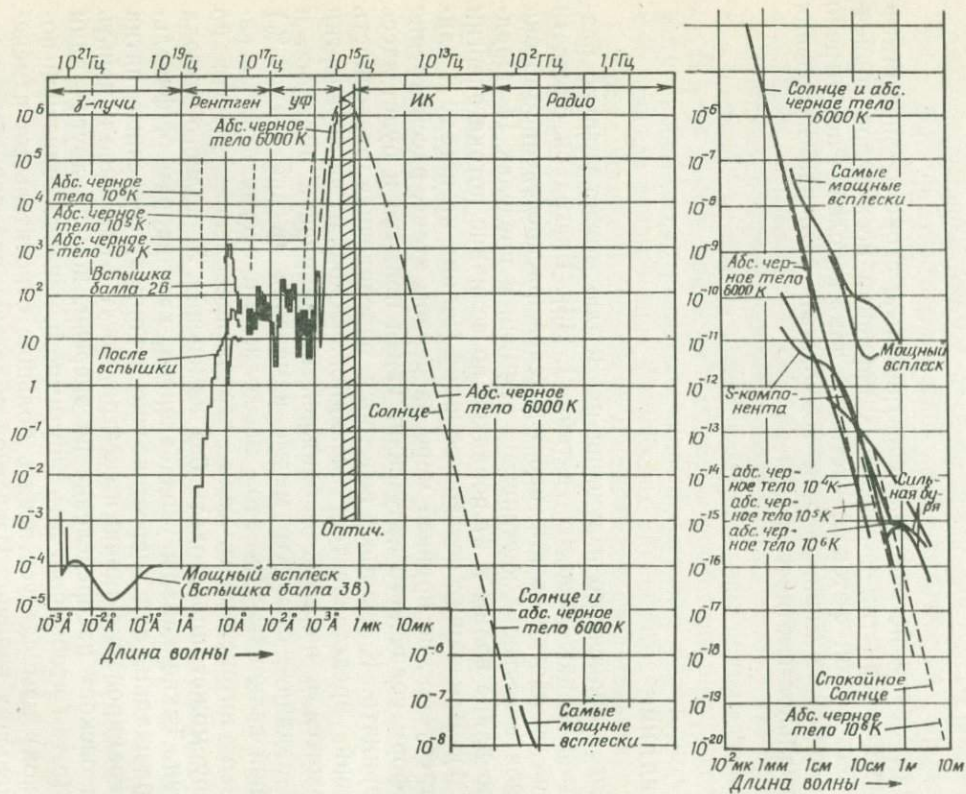


Рис. 1. Распределение энергии (в $\text{эрг}/\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Å}$) в солнечном спектре для низкого и высокого уровней активности.

Таблица 1

Полная энергия (эрг/см²·с при 1 а. е.)

Излучение	Частицы и поля
Солнечная постоянная $S=1,4 \cdot 10^6$	(Нейтрино $5 \cdot 10^4$) Солнечный ветер 1 Магнитное поле 10^{-2}

Распределение энергии

Излучение		Частицы и поля
4 мкм до ∞ 3000 Å до 4 мкм (за исключением нейтрино) 1200—3000 Å	700 98 % полного потока $1,6 \cdot 10^4$	(Нейтрино $5 \cdot 10^4$) Энергичные час- тицы 0,05
Лайман α 300—1200 Å 30—300 Å	3—6 2 1	Нейтроны Галактические космические лучи 0,0006
10—30 Å 0,1—10 Å 0—0,1 Å	0,01 10^{-3} — 10^{-5} 0 — 10^{-6}	

открытие и недавнее объяснение природы корональных дыр явилось ключом к пониманию флуктуаций солнечного ветра [47]. Развитие магнитных структур Солнца на уровне фотосферы изображено на рис. 2.

В данном контексте не имеет смысла рассматривать далекое инфракрасное и радиоизлучение, поскольку в этих областях их уровень меньше уровня собственного излучения Земли. Следует отодвинуть на последнее место также и явления, связанные со вспышкой — просто вследствие того, что они представляют собой относительно редкие события. Впрочем, вспышки не так уж редки. В любой момент, спокойно Солнце или активно, на нем существуют несколько ярких рентгеновских точек с характеристиками, соответствующими вспышкам [16]. Нет сомнений, что присутствующие на этой конференции более тщательно обсудят роль вспышек (ср. [34]).

Кроме изменений потока энергии от Солнца, следует иметь в виду модуляцию, которая возникает по чисто геометрическим причинам: из-за вращения Солнца, эллиптичности орбиты Земли и наклона ее орбиты. В табл. 2 дана сводка этих факторов.

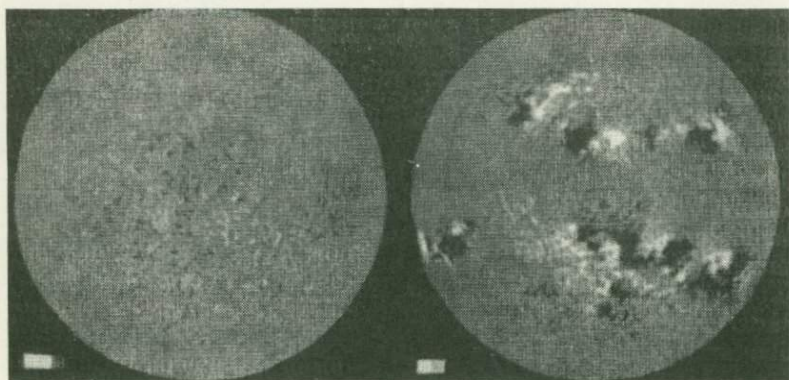


Рис. 2. Магнитогаммы фотосферы, иллюстрирующие изменения в течение солнечного цикла. Справа — спокойное Солнце 26 января 1976 г.; слева — Солнце в период высокой активности, 23 июня 1978 г.

Таблица 2

Геометрические эффекты

Эффект	Период, сут	Амплитуда модуляции
Вращение Солнца	27	Зависит от λ : экспоненциально уменьшается с λ в УФ 25% λ 1200 Å 1% λ 3000 Å [20]
Расстояние от Земли до Солнца	~27,5 365	0—0,4% для факельных площадок ±3,4% (максимум 2 янв.; его положение в году изменяется с периодом 26 000 лет)
Наклон солнечного экватора к эклиптике	365	$B_0 = 0$ (5 янв., 6 июня) $B_0 = -7,2^\circ$ (7 марта) $B_0 = +7,2^\circ$ (8 сент.), только для частиц:
Спирали Архимеда	—	(Оптимальная солнечная долгота: 50°W от центрального меридиана, запаздывание эффектов у Земли: 1—4 сут)

2. ИЗЛУЧЕНИЕ

2.1. ВИДИМОЕ — БЛИЖНИЙ ИК-ДИАПАЗОН, $0,3 \text{ мкм} < \lambda < 4 \text{ мкм}$, 98 % ОТ S (СОЛНЕЧНОЙ ПОСТОЯННОЙ)

Солнечный континуум в видимой области возникает вследствие свободно-связанных и свободно-свободных переходов у отрицательных ионов водорода в фотосфере.

Почему могла бы изменяться S ? В отсутствие ядерных источников энергии наблюдаемая светимость может поддерживаться гравитационным сжатием, составляющим всего 10^{-4} угловых секунд в год. Если Солнце существует за счет запасенного тепла и гравитационной энергии, изменение должно быть ненаблюдаемым в течение исторических эпох, даже при использовании современных инструментов [12]. Каковы же основания утверждать, что S может флуктуировать с характерными временами в 1 год или несколько лет? Приведем здесь лишь один пример: большую неопределенность роли конвекции в теории внутреннего строения звезд [29]. Конвекция представляет собой стохастический процесс, эффективность которого определяется величиной отношения длины перемешивания к шкале высот давления l/H . Диабон и Ньюмен [10] показали, что изменение l/H на 0,02 приводит к изменению $\Delta S/S$ на 1 %.

Каковы свидетельства изменений S во времени? Значения солнечной постоянной определялись одновременно в Монтекума (Чили) и Тейбл-Маунтин (Калифорния, США) с 1923 по 1942 г., а затем продолжались до 1955 г. по программе Смитсоновского института [1]. Стерном и Дайтером [38] была определена ковариация между усредненными за 10 сут данными этих станций. Ковариация результатов независимых измерений переменной величины соответствует ее изменениям, не зависящим от ошибок наблюдений. Пусть Z — значение S , измеряемое в данный момент на каждой из двух станций. На одной из станций измерено значение $X = Z + \epsilon$, где ϵ — ошибка измерения, статистически не зависящая от Z . На другой станции получено $Y = Z + \eta$, где η также не зависит от Z . Положим, что η и ϵ не зависят друг от друга, тогда дисперсия Z определяется как $\sigma_Z^2 = XY - \bar{X} \cdot \bar{Y}$. Было обнаружено, что, исходя из значения σ_Z , величина $\Delta S/S = 0,2 \%$, что является верхней границей изменений S за весь 30-летний период наблюдений. Этот достаточно жесткий (0,2 %) верхний предел изменений S следует рассматривать как характеристику полного ряда данных за 30 лет. Не исключается возможность и больших вариаций на отдельных участках этого ряда. К сожалению, нет возможности извлечь из них полезную информацию, поскольку для небольшого числа

измерений слишком высоки значения ошибок ϵ и η . Всесторонний обзор этих исследований дан Хойтом [21].

Анализ данных солнечных радиометрических мониторов, установленных на космических аппаратах «Маринер-6 и 7», а также величин S по данным Смитсоновского института был проведен Фокэлом и др. [14] с целью установления корреляции S с характеристиками солнечных пятен и факельных площадок. Радиометры «Маринеров» измеряли величину S в течение 5 месяцев вблизи максимума солнечной активности в 1969 г., когда по диску проходило много пятен и факельных площадок. Однако заметной модуляции величины S найдено не было: $\sigma = 0,05\%$ для пятен и $0,07\%$ для факельных площадок. Это накладывает сильные ограничения на величину изменчивости S , однако в данном случае можно говорить о слишком уж коротком отрезке времени.

Для устранения влияния ошибок наблюдений и выделения предполагаемой зависимости между характеристиками образований на Солнце и величинами S Смитсоновской обсерватории исследовалась корреляция для пар дней, соответствующих высокой и низкой активности в пределах одного месяца. Для солнечных пятен не было обнаружено значимой корреляции, однако для факельных площадок появляется положительная корреляция (несколько меньшая 2σ). Принимая во внимание, что по данным космических аппаратов нет явной зависимости между S и факельными площадками, Фокэл и др. [14] предположили, что зависимость, найденная в наземных наблюдениях, может быть обусловлена атмосферным озоном (ср. [2]). Однако и в этом случае не выявляется зависимость, характеризующаяся небольшим временным масштабом, между S и факельными площадками.

Какую величину модуляции S вследствие наличия пятен и факельных площадок следует ожидать? Краткий ответ таков: мы не знаем. Смит и Готтлиб [37], исходя из геометрических соотношений, ставят в соответствие Цюрихскому числу солнечных пятен $Z_s = 200$ уменьшение величины S не более чем на $0,1\%$. Эта оценка является верхним пределом.

Величина эффективного контраста факельных площадок недостоверна, всегда существует вопрос о роли окружающих ее темных участков — пор и микропор, не разрешаемых при наблюдениях. Измерения Чепмена [9] вблизи лимба избыточной яркости из-за наличия факельных площадок дают величину от ~ 1 до 3% по всему диску. Ливингстон [26] приводит значение модуляции из-за факельных площадок $0,4\%$ для всего диска в начале 21 цикла. Однако этот эффект становится менее определенным при повышении активности (см. также доклад Хойта).

Может ли падающее на Землю излучение изменяться, если S остается постоянной? Если бы Солнце излучало как абсолютно черное тело, в соответствии с законом Планка ответ был бы: нет. Однако Солнце — совсем не абсолютно черное тело. Правда, распределение энергии в видимой и в инфракрасной областях спектра $6000 \text{ \AA} < \lambda < 1 \text{ мм}$ напоминает планковскую кривую, соответствующую температуре 6000 К (см. рис. 1 и [31]), и это вводит в заблуждение. Поток солнечного излучения определяется коэффициентом поглощения ионов H^- в видимой и инфракрасной областях, а также функцией источника, несколько видоизмененной за счет экранирования линиями в области спектра $1600 \text{ \AA} < \lambda < 6000 \text{ \AA}$. При сканировании спектра по длине волны мы наблюдаем различные глубины в атмосфере, имеющей резкий градиент температуры (см. [15]). Поглощение в линиях блокирует долю потока в непрерывном спектре, возрастающую при переходе к голубому участку спектра с $\lambda < 4000 \text{ \AA}$; это экранирование линиями вызывает в нижней фотосфере ретротермический эффект в $\sim 225 \text{ К}$ [7]. Интенсивность некоторых сильных фраунгоферовых линий изменяется в течение солнечного цикла. Например, интенсивности в центре CaIIH и K увеличились в 1977 г. на $\sim 5,7\%$ по сравнению с величинами, характерными для спокойного Солнца [44]. Интенсивность других линий зависит от недостаточно хорошо исследованного механизма уширения, названного микротурбулентностью, который может быть проявлением волновых процессов под поверхностью Солнца. Ретротермический эффект вызывает рост характеристической температуры T_c , которая отличается от температуры $T_{\text{эфф}}$, соответствующей солнечной постоянной, и зависит от интегрального коэффициента экранирования линиями [8]:

$$\frac{T_c}{T_{\text{эфф}}} = \left(\frac{1}{1 - \eta} \right)^{1/4}.$$

Для Солнца $\eta = 0,138$, т. е. $\sim 14\%$ от полного потока перехватывается спектральными линиями. При увеличении η на 1% инфракрасное излучение увеличивается за счет ультрафиолетового на $\sim 0,5\%$.

Нам известно только одно измерение потока излучения в течение длительного периода времени, выполненное Петтитом [30], непрерывно измерявшим в течение 7 лет излучение в диапазоне от 3200 до 5000 \AA . Он обнаружил сильную корреляцию между ультрафиолетовой компонентой спектра и солнечными пятнами. Эффект так и не был объяснен.

Какова скорость изменения S и $T_{\text{эфф}}$ вследствие эволюции Солнца по главной последовательности? Ничтожна; $\Delta S/S \sim 2 \times 10^{-10} \text{ год}^{-1}$; $\Delta T_{\text{эфф}} \sim 4 \cdot 10^{-8} \text{ К/год}$.

2.2. ИНФРАКРАСНЫЙ И ДАЛЕКИЙ ИНФРАКРАСНЫЙ ДИАПАЗОН, $4 \text{ мкм} < \lambda < 1 \text{ мм}$, $\Delta S/S \sim 0,06 \%$

Это излучение возникает вследствие свободно-свободных переходов у отрицательных ионов водорода. Высоты, на которых оно возникает, простираются от верхней фотосферы (для $\lambda=4$ мкм) до нижней хромосферы и области минимума температуры (для $\lambda=1$ мм). Поскольку энергия, излучаемая в этом диапазоне, мала, процентное изменение солнечной постоянной здесь ничтожно, особенно если учесть и тот факт, что собственное излучение Земли имеет максимум вблизи 10 мкм.

2.3. РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ, $1 \text{ мм} < \lambda < \infty$

Оно обусловлено свободно-свободными переходами электронов и возникает начиная с уровня хромосферы (для $\lambda=1$ мм) и в короне ($\lambda > 1$ м); оно сильно изменчиво, как это показано на рис. 1, но процент изменения полной энергии также пренебрежимо мал.

2.4. УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, $1220 < \lambda < 3000 \text{ \AA}$, $\Delta S/S \sim 1 \%$

Эта сложная и важная область, в которой происходит изменение характера спектра от континуума, обусловленного свободно-связанными переходами (3000 Å), к эмиссионным линиям за счет связанно-связанных переходов ($\lambda < 1750$ Å) и к отсутствию линий поглощения $\lambda < 1500$ Å. Доля ультрафиолетового излучения от активных областей растет с уменьшением длины волны, а 27-суточная модуляция, вызванная вращением Солнца, становится более заметной [20]. В недавних обзорах Симона [36] и Шмидтке [33] подчеркнута неопределенность наших знаний об области ультрафиолетового излучения. Согласно последнему обзору, «существует длиннопериодная изменчивость крайнего ультрафиолетового излучения в течение солнечного цикла. Однако имеющиеся данные не позволяют количественно определить изменения в течение 20 цикла». Это вызвано трудностью измерений. Солнечный ультрафиолетовый монитор спектра излучения (СУМСИ) является частью программы «Спейс Шаттл» и может прояснить роль изменений ультрафиолетового излучения, учитывая, что он будет запускаться многократно. При помощи СУМСИ можно сканировать область длин волн от 1200 до 4000 Å и сравнивать поток излучения с потоком от встроенного калиброванного источника. (Измерения ультрафиолетового излучения должны также производиться на космическом аппарате «Нимбус-G», который предполагается запустить в конце 1978 г.

Однако в этом случае калибровка отсутствует. По-прежнему останутся существенными для установления солнечной постоянной и границ ее изменчивости измерения на ракетах и спутниках интегрального потока в этой области [46].

2.5. ЛАЙМАН α , 1216 Å, $\Delta S/S \sim 2 \div 4 \cdot 10^{-4} \%$

Поток в этой линии сравним с интегральным потоком излучения от всей области с более короткими длинами волн. Модуляция за счет 27-суточного вращения не превосходит 30%. Наблюдается две компоненты: одна от спокойного Солнца, которая образуется в хромосферной сетке, другая от активных областей. Поток из хромосферной сетки изменяется вдвое от максимума активности до ее минимума. Солнечные вспышки приводят к следующим изменениям потока от всего диска [37]:

Балл	Относительная частота	Увеличение L_{α} , %
1	0,89	2
2	0,10	8
3	0,01	20

2.6. КРАЙНЕЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ,

$300 < \lambda < 1200 \text{ Å}$, $\Delta S/S \sim 2 \cdot 10^{-6} \%$

Эта область спектра состоит из эмиссионных линий, идущих из переходной зоны (которая все еще повторяет отдельные характерные черты хромосферной сетки), а также из корональных линий, излучаемых в основном активными областями и корональными конденсациями. У компоненты, соответствующей переходной зоне, наблюдается модуляция $\pm 15 \%$, соответствующая 27-суточному вращению, в то время как вариации корональных эмиссий, связанные с вращением, составляют от 200 до 300%. Не следует считать достоверными различные данные об изменении в течение цикла потока в этой области, однако Тимоти [41] не исключает изменения в два раза.

2.7. МЯГКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ И КРАЙНЕЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, $30 < \lambda < 300 \text{ Å}$, $\Delta S/S = 1 \cdot 10^{-4} \%$

В этой области длин волн помимо корональных участков активных областей видны также так называемые «яркие рентгеновские точки». Их можно рассматривать как характерные

черты спокойного Солнца, наблюдаемые в наиболее коротковолновом диапазоне; они отождествляются с короткоживущими миниатюрными биполярными образованиями. Примерно 10 % от общего числа точек возникает при вспышках [16], причем обычная вспышка дает увеличение потока вплоть до 20 раз.

2.8. МЯГКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ,

$$10 < \lambda < 30 \text{ \AA}, \Delta S/S = 1 \cdot 10^{-6} \%$$

Эта область образуется тепловым континуумом от свободно-свободных переходов и эмиссионными линиями ионов при температуре 10^6 К, таких, как O VIII и Fe XVII. Изменчивость вследствие солнечного вращения достигает 5 раз, а в цикле активности до 100 раз [11].

2.9. ЖЕСТКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ,

$$0,1 < \lambda < 10 \text{ \AA}, \Delta S/S = 1 \cdot 10^{-7} - 10^{-9} \%$$

Преимущественно относится к вспышечным событиям, причем непрерывный спектр имеет степенной характер. В отдельных явлениях наблюдаются вариации на несколько порядков величины [23].

2.10. ГАММА-ЛУЧИ, $\lambda < 0,1 \text{ \AA}$

При ядерных реакциях в солнечных вспышках возникают заметные гамма-линии, в основном они используются при диагностике вспышек [32].

3. ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

В солнечном ветре поля и плазма неотделимы друг от друга, их следует рассматривать совместно. В отличие от потока фотонов на пути от Солнца к Земле с частицами и полями могут происходить существенные изменения. Поэтому мы будем интересоваться лишь областью внутри радиуса в 1 а. е., рассматривая это расстояние как граничное. Например, вспышечные нейтроны никогда не достигают Земли, поскольку время их жизни составляет 11 мин. Взаимодействие потоков солнечного ветра, имеющих высокие и низкие скорости, усиливает сопутствующее им магнитное поле, что отражается в геомагнитных явлениях. В этом разделе основное внимание уделено гелиосфере внутри орбиты Земли, хотя там, где это возможно, будет указан также физический источник на Солнце.

3.1 СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Основные свойства солнечного ветра подытожены Фельдманом и др. [13] (см. табл. 3). В первом приближении данные

Таблица 3

Основные свойства солнечного ветра

	Низкоскоростной поток	Высокоскоростной поток	Среднее значение
Концентрация частиц N , см^{-3}	12	4	9
Скорость частиц V , км/с	327	702	468
Поток энергии частиц, эрг/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$)	1,68	2,15	2,05
Состав N_{α}/N_p	0,038	0,048	0,047
Магнитное поле $B(\gamma)$	—	—	$6,2 \pm 2,9$
Плотность энергии магнитного поля $B^2/8\pi$, эрг/ см^3	—	—	$1,7 \cdot 10^{-10}$
Поток магнитной энергии $V \cdot (B^2/8\pi)$, эрг/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$)	0,0056	0,012	0,008

в этой таблице являются инвариантами солнечного цикла. Впрочем, некоторая модуляция возникает вследствие преимущественного возникновения высокоскоростных потоков в периоды, предшествующие минимуму солнечной активности [4, 28]. Солнечный ветер состоит из протонов и равного количества электронов, а также содержит несколько изменяющуюся фракцию α -частиц и более тяжелых элементов. Хотя отношение $N_{\alpha}/N_p = 0,047 \pm 0,019$ и не постоянно, особенно в низкоскоростных потоках [43], это отношение определенно не соответствует данным спектроскопических наблюдений в протуберанцах, где $N_{\alpha}/N_p = 0,10 \pm 0,25$ [19], а протуберанцы образуются из коронального и хромосферного газов. Это несоответствие подчеркивает тот факт, что наши знания о происхождении солнечного ветра убывают по мере приближения к поверхности Солнца. Все, что мы узнали за последние годы, это то, что высокоскоростная компонента ветра исходит из корональных дыр.

Корональные дыры представляют собой области в короне с аномально низкой плотностью и температурой [47]. На рентгеновских изображениях ($\lambda < 60 \text{ \AA}$) иногда вообще не заметно излучение в дырах, в то время как везде на остальных участках диска всегда наблюдается некоторое излучение. Наиболее близко к истине предположение, что дыры представляют собой области с незамкнутыми, расходящимися магнитными полями. Такое предположение следовало из изучения фотографий, полученных во время затмений, однако наиболее ясно указывают

на связь с открытыми полями современные экстраполяции потенциальных полей по фотосферным магнитограммам [25].

Невозможно, просто рассматривая магнитограмму всего диска, предсказывать, где должны находиться корональные дыры. Однако при сравнении фотографии корональной дыры с магнитограммой за тот же день большинство людей заявит: «Конечно, это области, где поля преимущественно открытые, а это области (на магнитной карте), очерчивающие корональную дыру». Проблема состоит в том, что на уровне фотосферы существует много замкнутых биполярных образований, расположенных внутри границ дыр. Открытая структура становится отчетливой лишь в том случае, когда поле экстраполируют вверх до $\sim 1,5 R_{\odot}$. Корональный газ в этой области истекает наружу радиально вдоль силовых линий, образуя наблюдаемый поток, при этом в оставшейся позади полости понижается температура и плотность.

Уже упоминалось, что корональные дыры наиболее ясно видны на рентгеновских изображениях, однако они также заметны на спектрогелиограммах в линии He 304 Å. Хромосферная линия He 10830 Å частично возбуждается корональной He 304 Å, и наземные измерения предыдущей линии ясно выявляют корональные дыры [18]. Исходя из синоптических карт в He 10830 Å за 5 лет, Болин и Шили [5], Шили и Харви [35] и другие (см., например, [22]) делают следующие выводы:

а. Корональные дыры являются источником (возможно, единственным) высокоскоростных потоков в солнечном ветре. Потоки из полярных дыр могут, изгибаясь, достигать плоскости эклиптики вблизи расстояния 1 а. е.

б. Дыры, особенно наименьшие из них, наиболее эффективны в том случае, когда они расположены на гелиографической широте, совпадающей с плоскостью эклиптики (B_0 в табл. 2). Величина потока пропорциональна площади дыры.

в. На фазе спада 20 цикла образовывались долгоживущие дыры, некоторые из них простирались от полюса до экватора. В настоящее время (начало 21 цикла) существует тенденция к образованию слабых, короткоживущих дыр; как и пятна, они образуются на высоких широтах.

Почему мы интересуемся высокоскоростными потоками? Потому, что в случае, когда за потоком с малой скоростью идет высокоскоростной, последний имеет тенденцию настичь его и сжать, приводя, таким образом, к усилению сопутствующего магнитного поля. Направленная к югу компонента поля B наиболее эффективно возбуждает геомагнитные бури (ср. [6]). Амплитуда южной компоненты должна быть подвержена 22-летней периодичности вследствие того, что происхождение B_z отчасти связано с полярными дырами.

Это приводит нас к тому факту, что именно межпланетное магнитное поле, а не частицы, является решающим фактором, ответственным за многие солнечно-земные явления. Возможно, более существенной, чем корональные дыры, является секторная структура магнитного поля (ср. [45]). Точно так же, как дыры проецируются на расстоянии $1,5 R_{\odot}$ в униполярные области, все Солнце при наблюдениях с низким разрешением разграничено на 4 или 2 зоны в соответствии с их полярностью. Эти зоны простираются вплоть до расстояния 1 а. е., образуя хорошо известную секторную структуру. Кросс-корреляция межпланетного магнитного поля на 1 а. е. и средних полей на уровне фотосферы дает время распространения около 4 сут. Связь секторной структуры с системой корональных дыр описана Хундхаузенем [22].

3.2. ВСПЫШЕЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ

В больших вспышках образуются [солнечные] космические лучи, достигающие Земли за время от 20 мин до 1 ч. Начиная с 1942 г. было зарегистрировано только 26 событий, в которых наблюдались релятивистские частицы [24], поэтому можно полагать, что редкость этих явлений исключает их влияние на связь Солнца и погоды.

Значительно чаще наблюдаются межпланетные ударные волны и выбросы сгустков частиц. В составленном Швесткой и Симоном «Каталоге явлений, связанных с солнечными частицами, 1955—1969» [40] описаны 732 события. Для распространения частиц к Земле наиболее оптимальной является исходная точка, расположенная на диске Солнца вблизи 50° к западу от центрального меридиана, хотя имеются и значительные смещения [42]. Кроме протонов и электронов наблюдаются также и тяжелые ядра. В некоторых явлениях, по-видимому, образуются только электроны. Межпланетные ударные волны могут модулировать интенсивность галактических космических лучей; таким образом, она изменяется в течение цикла активности.

3.3. СОБЫТИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ЧАСТИЦАМИ НЕИЗВЕСТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Часто геомагнитные возмущения нельзя отождествить с корональной дырой, вспышкой или другим явлением на Солнце. Возможно, существуют определенные активные области, постоянно испускающие частицы, но, согласно [39], это неверно. Другие вероятные объяснения — залимбовые вспышки и медленно движущиеся выбросы корональной материи [17]. Во всяком случае, их относительная энергия мала.

3.4. ИЗЛУЧЕНИЕ НЕЙТРИНО

Согласно теории, вклад от нейтрино, возникающих в p - p -реакциях, в полный поток энергии Солнца не является пренебрежимо малым и составляет 3,5 % [3]. Неудача эксперимента Дэвиса по обнаружению этого потока могла произойти вследствие ошибки в данных о сечении реакции $\nu - {}^8\text{B}$ (хотя это и маловероятно). Нейтрино могут распадаться, еще не достигнув поверхности Солнца [3], в этом случае внутренние слои должны быть связаны потоком энергии непосредственно с поверхностью (что также маловероятно). Таким образом, по-видимому, в данном контексте интерес к нейтрино имеет только академический характер.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя минимум начальных предположений, мы попытались разобраться в запутанном наборе потоков солнечной энергии к Земле. Хотя это еще и не доказано, представляется вероятным, что солнечная постоянная оказывается неизменной во времени. В этом случае первой из возможных причин солнечно-климатических связей является изменение излучательной способности, причем основной механизм здесь — экранирование линиями, преобразующее ультрафиолетовое излучение в видимое и инфракрасное. Вторая возможная причина — это солнечный ветер (как частицы, так и поля), в основном поскольку хорошо известно, что он эффективно вызывает геомагнитные эффекты. Напомним, что только у межпланетного поля существуют признаки 22-летней изменчивости, которая необходима по данным исследований цикличности засух.

В заключение отметим, что представляются недостаточными планы будущих наблюдений, направленных на улучшение наших знаний об изменении излучательной способности. Если измерения по программе СУМСИ пойдут, то необходимы регулярные полеты в течение длительного времени в будущем. Возможно, желательно расширение диапазона измерений за 4000 Å в ближнюю инфракрасную область.

При подготовке этого обзора для меня были неоценимы беседы, в которых участвовали Д. Кэбо, Т. Дьюэлл, Дж. Харви, К. Пайерс, Н. Шили и О. Р. Уайт.

Литература

1. Abbot C. G., Aldrich L. B., Hoover W. H. *Annals. Astrophys. Obs. Smithsonian Inst.* **6**, 85, 1942.
2. Angione R. J., Medeiros E. J., Roosen R. G. *Nature*, **261**, 289, 1976.

3. *Bahcall J. N., Sears R. L.*, Ann. Rev. Astron. and Astrophys., **10**, 25, 1972.
4. *Bame S. J., Asbridge J. R., Feldman W. C., Gosling J. T.* Astrophys. J., **207**, 977, 1977.
5. *Bohlin J. D., Sheeley N. R., Jr.* Solar Phys., **56**, 125, 1978.
6. *Burlaga L. F., Lepping R. P.* Planet Space Sci., **25**, 1151, 1977.
7. *Carbon D. F.* Thesis, Harvard Univ., 1972.
8. *Carbon D. F., Gingerich O.* The Grid of Model Stellar Atmospheres from 4000° to 10,000°. In: Theory and Observation of Normal Stellar Atmospheres, ed. by O. Gingerich, MIT Press, Cambridge, 1969, p. 377.
9. *Chapman G. A.* Ann. N. Y. Acad. Sci., **262**, 481, 1975.
10. *Dearborn D. S. P., Newman M. J.* Preprint (Cal. Tech.), February, 1978.
11. *Доннелли Р.* Крайнее ультрафиолетовое и рентгеновское излучение.— В сб. Поток энергии Солнца и его изменения. Под ред. О. Уайта. М.: Мир, 1980, с. 46—47.
12. *Eddington A. S.*, The Source of Stellar Energy. In: The Internal Constitution of the Stars, Cambridge Univ. Press, London, p. 289, 1926.
13. *Фельдман У., Асбридж Дж., Бейли С., Гослинг Дж.* Солнечные плазмы и магнитные поля.— См. ссылку [11], с. 377—411.
14. *Foukal P. V., Mack P. E., Vernazza J. E.* Astrophys. J., **215**, 952, 1977.
15. *Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cunn Y.* Solar Phys., **18**, 347, 1971.
16. *Golub L., Krieger A. S., Silk J. K., Timothy A. F., Viaiana G. S.* Time Variations of Solar X-ray Bright Points. In: Solar Gamma-, X-, and EUV Radiation, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, p. 23, 1975.
17. *Gosling J. T., Hildner E., Asbridge J. R., Bame S. J., Feldman W. C.* J. Geophys. Res., **82**, 5005, 1977.
18. *Harvey J. W., Sheeley N. R., Jr.* Solar Phys., **54**, 343, 1977.
19. *Heasley J. N., Milkey R. W.* Astrophys. J., **221**, 677, 1978.
20. *Хит Д. Ф., Текакара М. П.* Солнечный спектр в области 1200—3000 Å.— См. ссылку [11], с. 212—232.
21. *Hoyt D. V.* The Smithsonian Astrophysical Observatory Solar Constant Program (submitted) Rev. Geophys. and Space Physics.
22. *Hundhausen A. J.* An Interplanetary View of Coronal Holes, In: Coronal Holes and High Speed Wind Streams (ed. by J. B. Zirker), Colorado Assoc. Univ. Press, Boulder, 1977, p. 225.
23. *Креплин Р. У., Дир К. Р., Хоран Д. М., Микинс Дж. Ф.* Спектр Солнца в области длин волн короче 10 Å.— См. ссылку [11], с. 313—339.
24. *Ланцеротти Л. Дж.* Измерения энергии солнечных частиц.— См. ссылку [11], с. 412—432.
25. *Levine R. H.* Large Scale Solar Magnetic Fields and Coronal Holes. In: Coronal Holes and High Speed Wind Streams, ed. by J. B. Zirker, Colorado Assoc. Univ. Press, Boulder, 1977, p. 103.
26. *Livingston W. C.* Nature, **272**, 341, 1978.
27. *Malitson H. H.* GSFC Report based on The Solar Output and its Variation, ed. by O. R. White, Colorado Assoc. Univ. Press, Boulder, 1977.
28. *Nolte J. T., Davis, J. M., Sullivan J. D.* Solar Wind Stream Structure During the Early Phase of Solar Cycles 20 and 21, submitted to Solar Physics, 1978.
29. *Parker E. N.* The Enigma of Solar Activity. In: Basic Mechanisms of Solar Activity, ed. by V. Bumba and J. Kleczek, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 1976.
30. *Pettit E.* Astrophys. J., **75**, 185, 1932.
31. *Пирс А. К., Аллен Р. Г.* Спектр Солнца в области 3—10 мкм.— См. ссылку [11], с. 187—211.
32. *Ramaty R., Lingenfelter R. E.* Gamma-ray Lines from Solar Flares. In: Solar Gamma-, X-, and EUV Radiation, ed. by S. R. Kane, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 1975, p. 363.

33. *Schmidke G.*, *Planetary and Space Sci.*, **26**, 347, 1978.
34. *Schuurmans C.* This volume, 1979 (с. 129 настоящей книги).
35. *Sheeley N. R., Jr., Harvey J. W.* *Solar Physics* (in press), 1978.
36. *Simon P. C.* *Planet. Space Sci.*, **26**, 355, 1978.
37. *Smith E. V. P., Gottlieb D. M.* *Space Sci. Rev.*, **16**, 771, 1974.
38. *Sterne T. E., Dieter N.* *Smithsonian Contrib. to Astrophys.*, **3**, 9, 1958.
39. *Svestka Z.* *Solar Flares*, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 1975.
40. *Svestka Z., Simon P.* *Catalog of Solar Particle Events, 1955—1969*, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 1975.
41. *Timothy J. G.*, *B. A. A. S.*, **7**, 407, 1975.
42. *Van Hollebeke, M. A. I., Ma Sung L. S., McDonald F. B.* *Solar Phys.*, **41**, 189, 1975.
43. Уайт О. Активность и переменность других звезд.— См. ссылку [11], с. 59—62.
44. *White O. R., Livingston W.* *Astrophys. J.* (in press), Dec. 1978.
45. *Wilcox J. M.* *Space Sci. Rev.*, **8**, 258, 1968.
46. Уилсон Р. К., Хики Дж. Р. Ракетные измерения солнечной постоянной в 1976 г. и данные об изменении потока солнечной энергии во время цикла № 20.— См. ссылку [11], с. 128—133.
47. *Zirker J. B.* *Coronal Holes — an Overview*. In: *Coronal Holes and High Speed Wind Streams*, ed. by J. B. Zirker, Colorado Assoc. Univ. Press, Boulder, p. 1, 1977.

АНАЛИЗ РЕГРЕССИОННЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ч. А. Лундквист, У. У. Вогэн

Ключом к использованию взаимосвязей между Солнцем, погодой и климатом является возможность предсказывать солнечную активность. Широкое применение в прогнозе цикла солнечной активности нашел регрессионный метод Мак-Ниша и Линкольна. В статье дан анализ чувствительности результатов этих регрессионных методов по отношению к таким параметрам, как минимум цикла, время в цикле, состав базы архивных данных и наличие или отсутствие нормировки данных о солнечном цикле. Для нескольких прошлых циклов приведены для сравнения прогнозы, различающиеся по этим исходным данным. Даны также выводы для текущего 21-го цикла.

Предположим, что механизм воздействия Солнца на погоду может быть установлен; польза от применения этого знания зависит, по-видимому, от оценки будущей солнечной активности. При экстраполяции трендов погоды на несколько месяцев или лет вперед должно потребоваться также предвидение развития отдельного солнечного цикла и, возможно, начальной фазы следующего цикла. Имеющиеся данные наблюдений солнечной активности в текущем цикле, безусловно, являются наиболее прямой информацией о дальнейшем ходе развития этого цикла.

Предметом этой статьи является возможное использование большинства недавно полученных солнечных данных для экстраполяции трендов на несколько последующих лет. Работа возникла из текущей задачи установления будущих величин плотности верхней атмосферы для вычислений времени жизни космических аппаратов (в частности, «Скайлэба»), но аналогичный подход может быть со временем применен и в предсказаниях погоды, основанных на ожидаемой солнечной активности. Мы не будем обсуждать возможное использование периодичности с большими характерными временами в последовательных солнечных циклах, хотя этот вопрос и привлекает

к себе много внимания (см., например, [1, 2]). Мы не будем также заниматься задачей с очень короткими характерными временами — предсказанием частных событий на Солнце (например, вспышек) — за часы или дни до их появления, хотя этот важный вопрос также был широко обсужден [3—5].

В качестве математического аппарата предсказания солнечной активности часто используется процедура линейной регрессии по методу, сформулированному Мак-Нишем и Линкольном [6]. Этот метод применяется Службой окружающей среды Национального управления по исследованию атмосферы и океана в выпусках «Solar Geophysical Data Prompt Reports». В несколько измененном виде этот аппарат используется также Центром космических полетов им. Маршалла НАСА.

Общая процедура начинается с задания базы архивных данных, например сглаженного цюрихского числа солнечных пятен $\bar{R}_{13}(i)$, определенного ниже. Эти архивные данные используются (в применяемом статистическом методе) для предсказания в текущий момент времени, i месяцев спустя после минимума цикла, величин $R_{13}(i+n)$ для более позднего, $i+n$ -го месяца. Для этого служит уравнение

$$R_{13}(i+n) = K(i, i+n) \Delta \bar{R}_{13}(i) + \bar{R}_{13}(i+n), \quad (1)$$

где $R_{13}(i)$ — сглаженное 13-месячное скользящее среднее.

$$R_{13}(i) = \frac{1}{24} \left[\bar{R}_1(i-6) + \bar{R}_1(i+6) + 2 \sum_{j=-5}^{j=5} \bar{R}_1(i+j) \right];$$

$\bar{R}_1(k)$ — среднее для k -го месяца значение ежедневных чисел солнечных пятен $R(d)$:

$$\bar{R}_1(k) = \frac{1}{m} \sum_{d=1}^m R(d);$$

$\bar{R}_{13}(i)$ — среднее значение в N циклах:

$$\bar{R}_{13}(i) = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N \bar{R}_{13}(i, \text{ в цикле } q);$$

$\Delta \bar{R}_{13}(i)$ — отклонение от среднего:

$$\Delta \bar{R}_{13}(i) = \bar{R}_{13}(i) - \bar{R}_{13}(i);$$

$K(i, i+n)$ — коэффициент линейной регрессии.

Очевидно, что эта процедура эмпирическая и не имеет никакой другой физической основы, кроме неявного предположения о существовании некоторого систематического подобия формы циклов солнечной активности. Предполагается, что если текущий цикл начал идти выше (или ниже) среднего цикла, то

в будущем текущий цикл скорее будет следовать ходу предыдущих циклов, чем идти выше (или ниже) среднего.

Мерой правильности этой предпосылки является статистический разброс, получаемый при проверке уравнения (1) на различных архивных данных. После того как получены значения $K(i, i+n)$, уравнение (1) может быть использовано для каж-

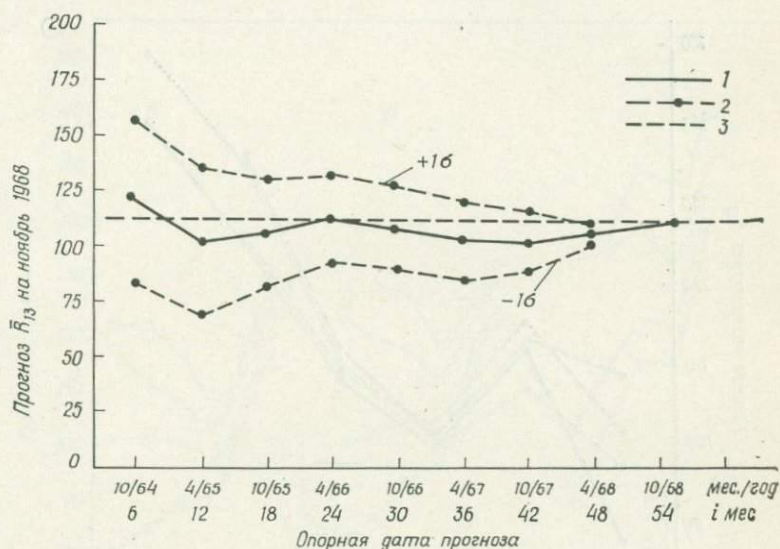


Рис. 1. Прогноз для 20-го цикла методом линейной регрессии. Данные за циклы 1—19 не нормализованы: 1 — прогноз, 2 — стандартное отклонение от прогноза, 3 — значение, реально наблюдавшееся в ноябре 1968 г. (110,6).

дого из предыдущих циклов с целью вычисления «предсказанной» величины $R_{13}(i+n)$ и последующего ее сравнения с действительно наблюдавшейся величиной. Для этих величин может быть вычислено среднеквадратичное отклонение. Это иллюстрируется рис. 1, где в качестве примера использован 20-й цикл, а циклы с 1-го по 19-й используются как архивные данные. Центральные кривые соответствуют предсказанным значениям $R_{13}(i, 55)$ как функции месяца i , для которого проводились вычисления по уравнению (1). Приведено также значение $R_{13}(i, 55)$, наблюдавшееся в действительности; наличие отклонений от прогноза очевидно. Кривые $\pm 1\sigma$ показывают среднеквадратичное отклонение между предсказанными значениями и наблюдавшимися для циклов с 1-го по 19-й. Согласно анализу методом линейной регрессии, 20-й цикл ведет себя идеально; к сожалению, это не относится ко всем циклам.

Разброс $\pm 1\sigma$ на рис. 1 (и в других аналогичных случаях) значителен для используемых значений n . Пытаясь уменьшить ожидаемый разброс, некоторые авторы исследовали с большим или меньшим успехом другие варианты метода линейной регрессии [1, 7]. Одна из простых модификаций состоит в замене минимальных значений чисел пятен в начале всех циклов нулевым

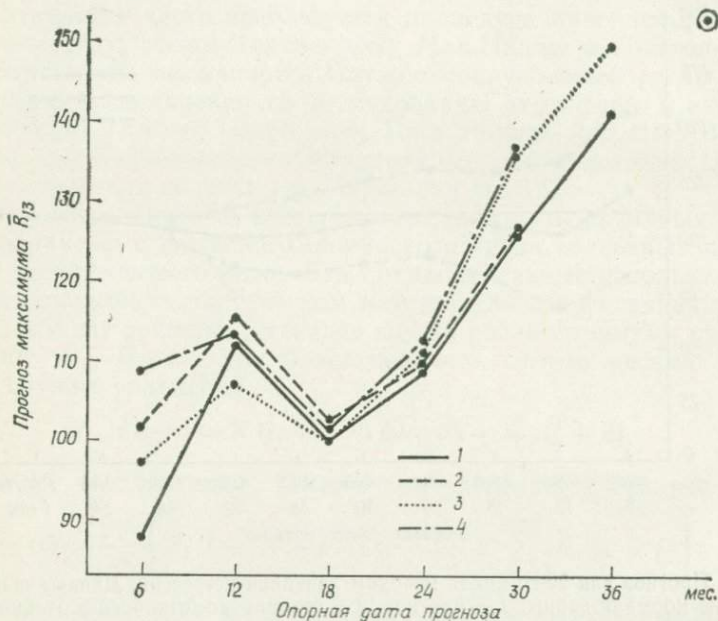


Рис. 2. Прогноз для 18-го цикла методом линейной регрессии: 1 — по циклам 1—17 и нормированным данным; 2 — по циклам 1—17 без нормировки; 3 и 4 — по циклам 8—17 с нормировкой и без нее. \odot — наблюдавшееся значение максимума 151,8 (май 1947 г.).

значением; затем выполняются вычисления по методу линейной регрессии и в конце минимальная величина снова добавляется к прогнозу. Такая модификация кажется естественной, поскольку из того, что данный минимум выше (или ниже) среднего минимума, еще не следует, что весь цикл выше (или ниже) среднего цикла. Эта нормировка всех минимумов к одной и той же величине (нулю) особенно существенна для случая текущего 21-го цикла, который начался с наибольшей из когда-либо зарегистрированных минимальных величин.

На рис. 2 показан прогноз максимума цикла 18 как функция i для случаев обработки с нормировкой и без нее. Прогнозы сильно различаются для ранних стадий цикла, но затем на более поздних стадиях различия становятся очень неболь-

шими. Цикл 18 случайно представляет собой пример, где применение метода линейной регрессии приводит к значительно менее удовлетворительным результатам, чем в предыдущем примере.

Еще в одном отношении применение метода линейной регрессии может приводить к различным результатам, вызванным

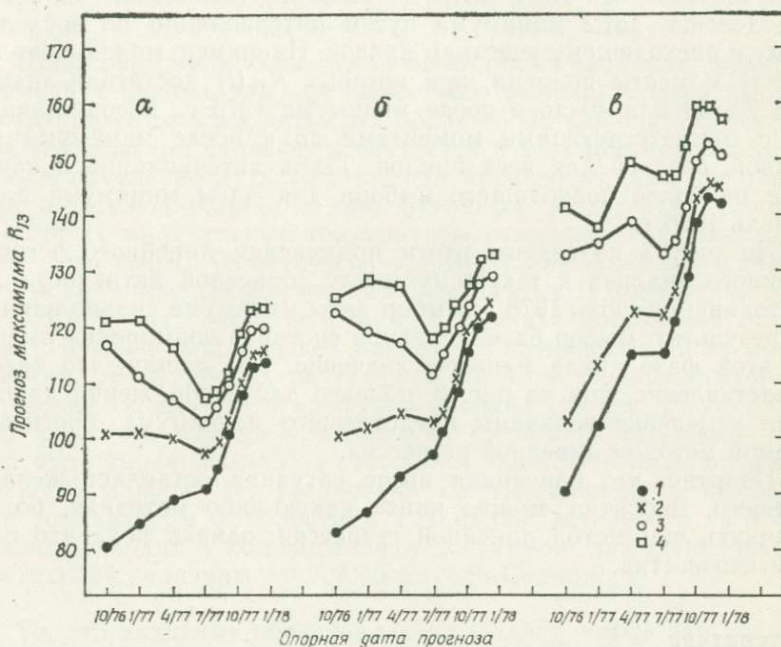


Рис. 3. Прогноз для 21-го цикла методом линейной регрессии. Группам кривых *a*, *б* или *в* соответствует предположение, что минимум цикла был в марте, апреле или июне 1976 г. соответственно. Использованы данные: 1 и 3 за циклы 1—20, 2 и 4 за циклы 8—20. Темные значки соответствуют нормированным данным, светлые — не нормированным.

различным выбором баз архивных данных. Величины R_{13} табулированы для 20 циклов, причем надежность данных возрастает по мере приближения к настоящему времени [8]. Отдавая себе отчет в том, что данные по более ранним циклам менее надежны, некоторые группы предпочитают исключить циклы с 1-го по 7-й из рассмотрения [7]. Возникает проблема выбора между дополнительной статистической обеспеченностью более длинной базы данных и более короткой, но и более точной базой. Сравнение использования различных архивных баз для 18-го цикла также приведено на рис. 2. Эффект такого выбора становится пренебрежимо малым спустя примерно год от начала цикла.

Для текущего 21-го цикла необычная проблема состоит в том, что для двух месяцев, марта и июня 1976 г., минимальные значения \bar{R}_{13} одинаковы, т. е. имеется двойной минимум. При использовании процедуры линейной регрессии величина максимума \bar{R}_{13} , ожидаемая для цикла, существенно зависит от того, какая дата принята соответствующей минимуму. Возможным выходом из этого затруднительного положения является определение даты минимума путем интерполяции по восходящему и нисходящему участкам кривой. Например, можно использовать моменты времени, при которых $R_{13}(i)$ достигали значений 20, 30 или 40 до и после минимума 1976 г., и сопоставить их с соответствующими моментами до и после минимума на кривой, средней для всех циклов. Такая интерполяция в качестве наиболее подходящего выбора для даты минимума дает апрель 1976 г.

На рис. 3 подведены итоги применения линейного регрессионного анализа к текущему циклу солнечной активности по состоянию на июль 1978 г. Выбор даты минимума сильно влияет на результат. Выбор базы данных и способов нормировки имеют на этой фазе цикла меньшее значение. Мы нашли, что такое представление, как на рис. 3, полезно для изображения диапазона изменения величины предстоящего максимума, прогнозируемой методом линейной регрессии.

Понятно, что описанная выше ситуация оставляет желать лучшего. Вероятно, можно найти какую-либо методику, более удачную, чем метод линейной регрессии, однако пока что она нам неизвестна.

Литература

1. Витинский Ю. И. Прогноз солнечной активности. Л.—М.: Изд. АН СССР, Ленинградское отделение, 1963.
2. Hill J. R. Nature, **266**, 151, 1977.
3. McIntosh P., Simon P. Solar Activity and Predictions (ed. P. S. McIntosh and M. Dryer), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1972, p. 343. [Имеется перевод: Симон П., Мак-Интош П. С. Обзор современных прогностических центров.— В сб. Наблюдения и прогноз солнечной активности/Под ред. П. Мак-Интоша и М. Драйера.— М.: Мир, 1976, с. 289—300.]
4. Smith J. B. Solar Activity and Predictions (ed. P. S. McIntosh and M. Dryer), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 429, 1972. [Имеется перевод: Смит Дж. Б. мл. Предсказание активности для конкретных участков активных областей.— См. ссылку [3], с. 339—350.]
5. Pick M., Simon P. Proceedings of the IEEE, **61**, 1303, 1973.
6. McNish A. G., Lincoln J. V. Transactions American Geophysical Union, **30**, 673, 1949.
7. Slutz H., Gray B., West L., Stewart G., Leftin M. Solar Activity Prediction, Contractor Report prepared by National Oceanic and Atmospheric Administration, NASA CR-1939, November 1971.
8. Waldmeier M. The Sunspot Activity in the Years 1610—1960, Schulthess and Co, Zurich, 1961.

ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ПОСТОЯННОЙ ВСЛЕДСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ НА СОЛНЦЕ

Д. В. Хойт

Проведено вычисление солнечной постоянной как функции времени с использованием известных величин контраста для структурных деталей активных областей на Солнце. Эффективная температура фотосферы считается в этих расчетах постоянной, а изменение лучистого выхода происходит, как предполагается, исключительно за счет активных областей на Солнце, у которых эффективные температуры отличаются от окружающей фотосферы. Теоретически среднегодовое значение солнечной постоянной изменяется не более чем на $0,102 \text{ мВт/см}^2$ или на $0,075 \%$ от своей величины. Солнечная постоянная становится меньше при большей солнечной активности. Если поток энергии из глубоких внутренних областей Солнца постоянен в течение характерного масштаба времени 100 лет, то уменьшение лучистого выхода в максимуме солнечной активности может быть уравновешено за счет накопления энергии в активных областях или за счет увеличения энергии конвекции. Повышение температуры фотосферы в максимуме активности на $1,1 \text{ К}$ также приводит к компенсации и достаточно для поддержания постоянной величины лучистого выхода Солнца.

То, что активные образования на Солнце, такие как солнечные пятна или фотосферные факелы, могут вызывать изменение солнечной постоянной, было уже в течение долгого времени темой, которую следовало рассмотреть. Лэнгли [1] был, вероятно, первым, кто исследовал эту задачу и пришел к выводу, что солнечная постоянная может изменяться с солнечной активностью менее чем на $0,1 \%$. Впоследствии отдельные вычисления эффекта воздействия большого пятна на солнечную постоянную были выполнены Митчеллом [2], Смитом и Готтливом [3] и многими другими. Все эти авторы обнаружили эффект порядка $0,1 \%$ и при вычислениях стремились показать, что эффект мал. До сих пор не было проведено систематических исследований, ставящих своей целью найти влияние на солнечную постоянную изменений солнечной активности в течение последнего столетия. В этой статье исследуются возможные изменения солнечной постоянной, вызванные изменениями

D. V. Hoyt. National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratory, Boulder, CO 80303 USA.

в активных областях на Солнце. Предполагается, что эффективная температура фотосферы остается постоянной.

Фотосферные факельные площадки, тени и полутени обладают яркостью, отличающейся от яркости фотосферы, и таким образом могут влиять на солнечную постоянную. Отношение интенсивности излучения I в активной области к интенсивности I_{ph} спокойной фотосферы известно как ее контраст. Фотосфер-

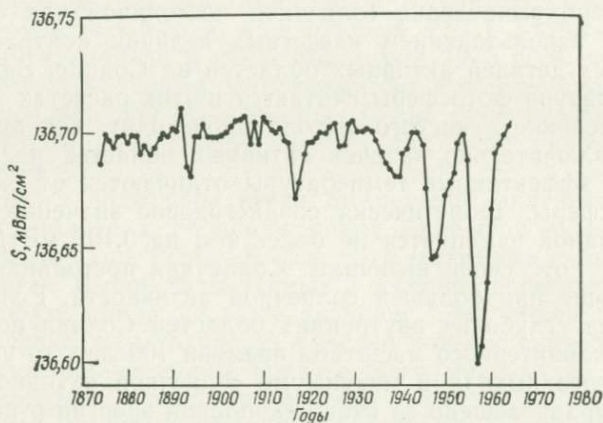


Рис. 1. Восстановление величины солнечной постоянной с использованием известных данных о контрасте структурных деталей активных областей на Солнце. Для спокойного Солнца величина солнечной постоянной равна 136,7 мВт/см² [12].

ные факелы представляют собой яркие участки на поверхности Солнца, их контраст около 1,15 [4—6]. Области тени имеют контраст около 0,28 [7], а полутени — около 0,75 [8]. Неопределенность каждого из трех значений контраста — около 0,05.

Среднегодовые значения площадей факелов, тени и полутени, исправленные за ракурсное сокращение, приведены Джонсом [9] для периода с 1874 по 1954 г. и Стриклендом [10] — с 1955 по 1970 г. Можно рассчитать солнечную постоянную для каждого года, используя эти значения площадей и контрастов. Итоги вычислений представлены на рис. 1. Максимальное отклонение солнечной постоянной составляет $-0,102$ мВт/см² или 0,075 % от ее среднего значения 136,7 мВт/см² [11]. До 1940 г. вариации от года к году были менее 0,03 %. Если выделение энергии Солнцем в эти отрезки времени было постоянным, то снижение лучистого выхода при максимальной численности солнечных пятен могло быть сбалансировано за счет образования таких активных областей на Солнце, как развитая корона в период максимума солнечного цикла или за счет усиления

конвекции, или за счет возрастания напряженности магнитного поля и так далее. Возможна альтернатива: если бы эффективная температура излучения фотосферы в максимуме числа пятен превышала температуру в минимуме не более чем на 1,1 К, то лучистый выход был бы постоянным. Изменения величины солнечной постоянной на рис. 1 следует понимать как верхний

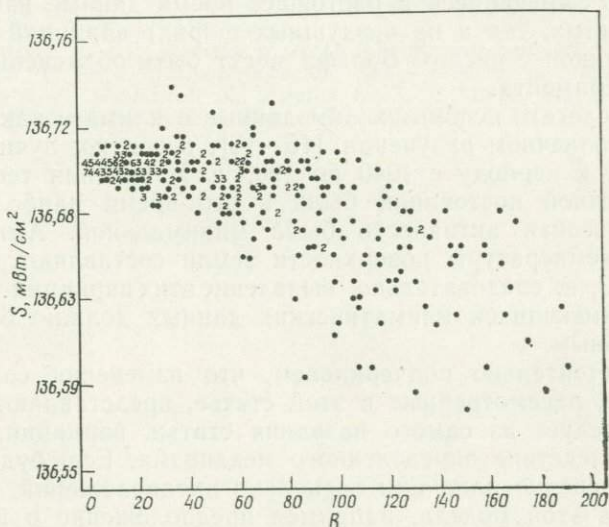


Рис. 2. Зависимость вычисленной солнечной постоянной от чисел Вольфа в период с 1923 по 1954 г. На этом рисунке величина солнечной постоянной для спокойного Солнца равна 136,7 мВт/см².

предел для тех вариаций, которые могут существовать в действительности, поскольку здесь не учтены возможные компенсирующие изменения эффективной температуры фотосферы.

Теоретические значения солнечной постоянной для периода с 1923 по 1954 г. представлены на рис. 2 в зависимости от числа солнечных пятен R [9]. В целом солнечная постоянная уменьшается с ростом числа солнечных пятен. Проведение по методу наименьших квадратов прямой через точки этого графика дает

$$S_0 = (136,7 \pm 0,00014) - (3,9 \cdot 10^{-5} \pm 0,2 \cdot 10^{-5}) R, \quad (1)$$

где S_0 — солнечная постоянная в мВт/см², а R — число Вольфа солнечных пятен. В уравнении даны также среднеквадратичные ошибки коэффициентов при уровне значимости 1%. Для

числа Вольфа, равного 200, уменьшение солнечной постоянной по сравнению с условиями спокойного Солнца ($R=0$) составляет 0,11%. Это изменение меньше вариаций солнечной постоянной, наблюдавшихся Абботом [12], Кондратьевым и Никольским [13] или Хойтом [14], и имеет противоположный знак. Если это не проявление одновременной модуляции в течение длительного времени температуры фотосферы или факельных площадей, то имеющиеся в настоящее время данные измерений (как наземных, так и на воздушных шарах) вариаций солнечной постоянной с числом Вольфа могут быть объяснены ошибками эксперимента.

Метеорологам, использующим данные о климате как информацию о солнечном излучении [15—16], вероятно, лучше всего обратиться к периоду с 1940 по 1963 г. Изменения теоретической солнечной постоянной были в это время наибольшими, а вулканическая активность была минимальной. Амплитуды вариаций температуры поверхности земли составляют, однако, менее 0,1°C, и, следовательно, выявление этих вариаций на фоне шумов в имеющихся климатических данных должно быть затруднительным.

Мы настоятельно подчеркиваем, что изменения солнечной постоянной, рассмотренные в этой статье, представляют собой, как это следует из самого названия статьи, вариации, возникающие вследствие определенного механизма. Если будет доказано, что неверно одно или несколько предположений, использованных в этой модели, например предположение о постоянной температуре фотосферы, то реальное поведение солнечной постоянной будет существенно отличаться от представленного здесь. В настоящее время исследуется правильность предположений, вошедших в модель.

Литература

1. Langley S. P. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 37, 5, 1876.
2. Mitchell J. M., Jr. In: Proc. of the Seminar on Possible Responses of Weather Phenomena to Variable Extra-Terrestrial Influences, NCAR Tech. Note TN-8, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1965.
3. Smith E. V. P., Gottlieb D. M. In: Possible Relationships Between Solar Activity and Meteorological Phenomena, Preprint X-901-74-156, NASA-Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1974.
4. Митропольская О. Н. Исследование физических условий в солнечных факелах. Изв. Крымской астрофиз. обсерв., 11, с. 152—154, 1954.
5. Митропольская О. Н. Контуры линий H_{α} и H_{β} в факеле и в фотосфере. Изв. Крымской астрофиз. обсерв., 11, с. 130—135, 1955.
6. Rogerson J. B. Ap. J., 134, 331, 1961.
7. Bray R. J., Loughhead R. E. Sunspots, Wiley, New York, 1964.
8. Tandberg-Hanssen E. Solar Activity, Blaisdell Publishing Co., Waltham, Mass., 1967.

9. Jones H. S. (compiler). Sunspots and Geomagnetic-Storm Data derived from Greenwich Observations, 1874—1954, H. M. Stationery Office, London, 1955.
10. Strickland D. J. Private communication, 1977.
11. Willson R. C., Hickey J. R. In: The Solar Output and its Variation. Colorado Associated University Press, Boulder, Colorado, 1977. [Имеется перевод: Уилсон Р. С., Хики Дж. Р. Ракетные измерения солнечной постоянной в 1976 г. и данные об изменении потока солнечной энергии во время цикла № 20.—В сб. Поток энергии Солнца и его изменения. Под ред. О. Уайта.—М.: Мир, 1980, с. 128—133.]
12. Abbot G. G. The Sun and the Welfare of Man, Smithsonian Institution Series, Inc., New York, 1934.
13. Kondratyev K. Ya., Nikolsky G. A. Q. J. R. Meteor. Soc., 96, 509, 1970.
14. Hoyt D. V. Revs. of Geophysics and Space Physics, in preparation, 1978.
15. Gerety E. J., Wallace J. M., Zerefos G. S. J. Atmos. Sci., 34, 673, 1977.
16. Mass C., Schneider S. H., J. Atmos. Sci., 34, 1995, 1977.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ И АБСОЛЮТНАЯ ВЕЛИЧИНА СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Г. Е. Шо, К. Фрёлх

Предполагалось, что поток излучения Солнца может флуктуировать в ближнем ультрафиолетовом и синем участках спектра вследствие связанного с солнечной активностью изменения экранирования линиями. Предварительные результаты измерения спектральной плотности излучения Солнца в видимой области спектра, проводившиеся в течение 6 мес в обсерватории Мауна Лоа, показали, что солнечная постоянная была неизменной, по крайней мере в пределах 1%. Однако существовали признаки, что излучение Солнца в синей области спектра ($\lambda \approx 400$ нм), возможно, изменялось на несколько десятых процента. Рекомендовалось измерять спектральную плотность излучения Солнца в абсолютных единицах (в системе СИ), с тем чтобы определить количественно ее изменения, характеризующиеся большими длительностями (десятилетия) и, вероятно, имеющие отношение к изменению погоды на Земле. В настоящее время за счет привлечения нового метода калибровки — при помощи радиометра с активной полостью и лазера на красителях — стало возможным измерение спектральной плотности излучения с точностью $\pm 1\%$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Хит и Текекара [1] сообщили об измерении вариации солнечного ультрафиолетового излучения, составляющей при $\lambda = 300$ нм около 1% в течение оборота Солнца и около 10% в течение солнечного цикла; изменчивость обычно уменьшалась с увеличением длины волны. Экстраполируя результаты измерений Хита и Текекары на видимую область спектра, можно ожидать, что спектральная плотность излучения может изменяться вблизи длины волны 400 нм в течение солнечного цикла в пределах нескольких процентов. Если это действительно так, то эти изменения потенциально могут быть важным звеном связи солнечных явлений с фотохимическими процессами и погодой.

G. E. Shaw. Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, Alaska 89701 USA.

C. Frölich. World Radiation Centre, CH-7260, Davos-Dorf, Switzerland.

В этой статье сообщается о предварительных результатах измерений спектральной плотности солнечного излучения, проводившихся в обсерватории Мауна-Лоа, Гавайские о-ва (высота 3380 м).

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И КАЛИБРОВКИ

Экспериментальная работа была направлена на измерение солнечного излучения видимой области спектра, проинтегрированного по длине волны в девяти узких (шириной 10 нм) областях длин волн. Области не были смежными и располагались между полосами поглощения земной атмосферы [2]. Радиометр включал в себя диэлектрические интерференционные фильтры для выделения отдельных диапазонов и кремниевый фотодетектор с $p-i-n$ проводимостью. Пропускание фильтров за пределами диапазона было измерено вплоть до значений оптической прозрачности в 10^{-7} при помощи лазера на красителе. Затем чтобы сравнить наши результаты с данными других авторов, было выполнено наложение аппаратной функции прибора на детальный относительный солнечный спектр Беккерса. Для целей калибровки использовались два эталонных источника: 1) 1000-ваттная эталонная лампа с галогенным циклом, откалиброванная в Национальном бюро стандартов США, и 2) абсолютный радиометр с прямым преобразованием в электрический ток и активной полостью, работающий совместно с лазером на красителе Мирового радиационного центра в Давосе, Швейцария. Точность измерения абсолютных величин потока излучения зависит от длины волны: ее оценка составляет $\pm 3\%$ для $\lambda < 500$ нм и $\pm 2\%$ для $\lambda > 500$ нм при калибровке с использованием лампы. Калибровка при помощи радиометра с активной полостью в одном диапазоне (длина волны 615,9 нм) дала оценку точности 0,8%. В эксперименте было уделено большое внимание обнаружению систематических ошибок и снижению их уровня.

3. МЕСТО НАБЛЮДЕНИЙ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЗА АТМОСФЕРУ

Для проведения измерений была выбрана обсерватория Мауна-Лоа, Гавайские о-ва (3380 м над уровнем моря), ввиду отсутствия там помех от аэрозольных примесей. Оптическая толща аэрозолей над станцией изменялась от 0,014 при $\lambda = 400$ нм до 0,009 при $\lambda = 600$ нм. Экстраполяция за атмосферу выполнялась методом Лэнгли. На рис. 1 показаны типичные отклонения экспериментальных точек от линий Лэнгли, проведенных методом регрессии. Постоянство ото дня ко дню наклона линий Лэнгли и их прямолинейность указывают, что при усло-

вии, если выбраны интервалы длин волн, не содержащие полосы поглощения приземных газов, в Мауна Лоа можно с точностью 0,5 % определять значения потока излучения вне атмосферы, проводя обычную экстраполяцию за атмосферу.

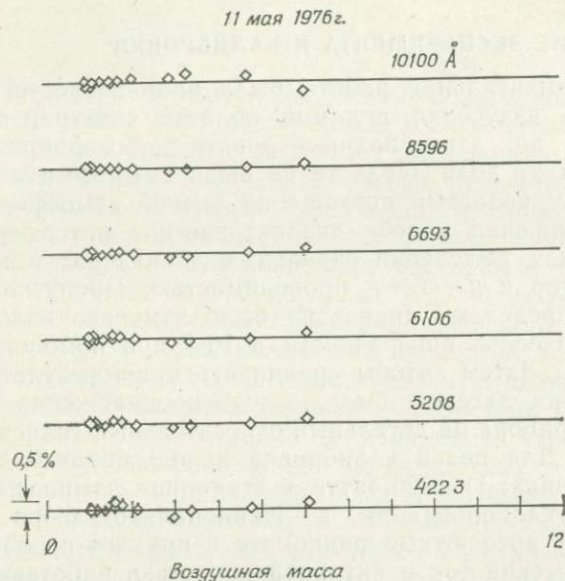


Рис. 1. Отклонение (в процентах) данных измерений по отношению к кривой Лэнгли, полученной методом наименьших квадратов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены значения относительных среднеквадратичных отклонений потока солнечного излучения, экстраполированных за атмосферу, для расстояния от Солнца в 1 а. е. за шесть месяцев с марта по август 1976 г. Хотя среднеквадра-

Таблица 1

Относительное среднеквадратичное отклонение (в процентах) показаний вольтметра фотометра, экстраполированных к нулевой воздушной массе, от полученной методом регрессии кривой дрейфа фотометра с марта по август 1976 г.

λ , нм σ , %	400,7 0,8	422,3 0,7	486,2 0,3	520,8 0,4	537,4 0,5	
λ , нм	610,6	659,5	669,3	750,3	859,6	1010,0
σ , %	0,5	0,5	0,7	0,6	0,5	0,2

точные отклонения малы (меньше 1%), флуктуации в потоке солнечного излучения должны быть даже меньше, поскольку неточность самих измерений составляла примерно $\pm 0,5\%$ из-за накопления случайных ошибок при калибровке фотометра и в процессе экстраполяции за пределы атмосферы. Вывод состоит в том, что спектральная плотность солнечного излучения была постоянной в пределах точности выше нескольких десятых процента при длинах волн больше ~ 500 нм, но могли быть не-

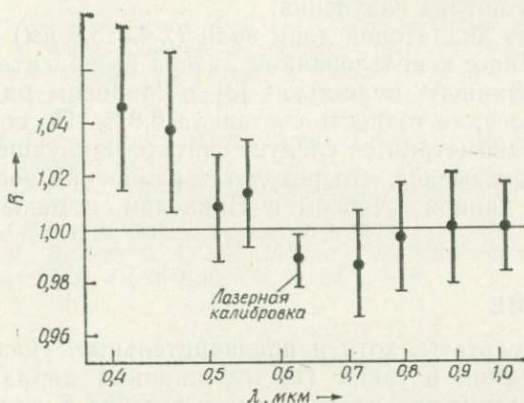


Рис. 2. Отношение средних абсолютных величин потоков солнечного излучения, измеренных в Мауна Лоа в феврале 1978 г., к величинам, полученным Лэбсом и Никкелем.

большие (порядка 0,3%) изменения плотности потока излучения в области $\lambda < 420$ нм. Такое примерное постоянство спектральной плотности излучения Солнца резко не соответствует изменениям этих величин, найденным и опубликованным другими авторами. Эти величины не согласуются друг с другом, в некоторых случаях отличаясь на 10—20%, особенно в синей области спектра. Мы считаем, что причину расхождения следует искать в скрытых систематических ошибках, присутствовавших во многих прошлых экспериментах.

На рис. 2 показана абсолютная величина измеренной спектральной плотности солнечного излучения в единицах величин, опубликованных Лэбсом и Никкелем [4]. При получении данных, показанных на рис. 2, мы интегрировали характеристику полосы пропускания каждого фильтра по солнечному спектру, взятому с большим разрешением. Атлас такого спектра был уже приведен Беккерсом [5] в соответствие с масштабами величин излучения, данными Лэбсом и Никкелем, и имелся на магнитной ленте.

Согласие между измеренными абсолютными значениями и значениями, опубликованными Лэбсом и Никкелем, вполне

удовлетворительное при длинах волн $\lambda > 500$ нм, но значения, измеренные в синей области спектра и соответствовавшие $\lambda = 410$ нм и $\lambda = 460$ нм, оказались на 4 % больше значений, опубликованных Лэбсом и Никкелем. Причина расхождения при более коротких длинах волн неизвестна, но следует отметить, что мы использовали в качестве эталона 1000-ваттную кварцевую иодную лампу. Наш опыт показал, однако, что этот тип ламп недостаточно надежен для точного определения абсолютной величины потока излучения.

В одном из диапазонов длин волн ($\lambda = 615,9$ нм) калибровка была проведена с использованием лазера на красителе и радиометра с активной полостью [3] в Мировом радиационном центре в Давосе; ее точность составила 0,8 %. По современному состоянию радиометрии ее следует считать наилучшей по точности. Рис. 2 показывает, что результат измерения весьма близок к величине, данной Лэбсом и Никкелем, и меньше ее всего на 1 %.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Наши результаты, хотя и предварительные, указывают, что излучение Солнца в узких (10 нм ширины) диапазонах длин волн было совершенно постоянным в течение 6 мес, хотя найдены признаки некоторой изменчивости ближнего ультрафиолетового излучения на уровне в несколько десятых процента. Этот результат не был совсем неожиданным, но из него ясно, что чрезвычайно важен систематический контроль изменений потока излучения Солнца, особенно в ближней ультрафиолетовой области, поскольку 1) наши данные указывают, что излучение в этом диапазоне длин волн может изменяться, и 2) ближнее ультрафиолетовое излучение Солнца заключает в себе большое количество энергии, которая поглощается в нижней стратосфере озоном, и, следовательно, его изменения могут обеспечивать связь Солнца с погодными явлениями. Результаты будущих измерений спектральной плотности солнечного излучения настоятельно рекомендуется представлять в абсолютной системе единиц СИ, с тем чтобы можно было оценить длиннопериодные изменения в течение по крайней мере одного цикла солнечной активности. Калибровка, использующая лазер на красителе и радиометр с активной полостью, предоставляет на первое время средство для проведения абсолютных измерений плотности потока излучения с точностью выше 1 %. Эта новая методика должна стать важной для будущих исследований в области солнечно-земной физики.

Это исследование было выполнено по контракту № 03-6-022-35154 со Службой геофизического мониторинга из-

менений климата Национального управления по исследованию атмосферы и океанов. В этом исследовании использовались калибровочные приборы Мирового радиационного центра в Давосе. Мы благодарим за помощь д-ров Дж. Гейста и Дж. Теча из Национального бюро стандартов США.

Литература

1. Heath D. F. and Thekaekara M. P. In: The Solar Output and Its Variation, Ed. by O. R. White, Colorado Associated University Press, Boulder, 1977. [Имеется перевод: Солнечный спектр в области 1200—3000 Å.— В сб. Поток энергии Солнца и его изменения. Под ред. О. Уайта.— М.: Мир, с. 212—232, 1980.]
2. Shaw G. E. Geophysical Institute Report, University of Alaska, Fairbanks, UAG-R-251, January, 1978.
3. Geist J., Steiner B., Schaefer R., Zalewski E., and Corrons A. App. Phys. Lett., 26, 309, 1975.
4. Labs D. and Neckel H. Solar Physics, 19, 3, 1971.
5. Beckers J. M., Bridges C. A. and Gilliam L. B. Air Force Geophysics Laboratory Report AFGL-TR-76-0126, Vol. 1 and 2, 1976.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕАКЦИИ АТМОСФЕРЫ НА АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ИНСОЛЯЦИИ

Ф. Б. Хауз

Построена эмпирическая модель системы Земля—атмосфера на основе анализа спутниковых данных о реакции атмосферы на вариации месячных значений солнечного облучения — инсоляции. Наблюдаемые на разных широтах величины отраженной от Земли радиации представлены как функции инсоляции, ее пространственного градиента и годовых вариаций. В предположении, что перенос и накопление тепла остаются постоянными, определяется излучательная способность и соответствующая температура поверхности, исходя из уравнения энергетического баланса.

Были выполнены точные расчеты для определения изменений средней температуры поверхности, связанных с вариациями наклона, эксцентриситета и долготы перигелия земной орбиты. Представлены временные ряды вариаций температуры за 500 000 лет до настоящего времени и на 100 000 лет вперед в области от 40 до 70°. Максимальные отклонения температуры имеют место для орбит с большим эксцентриситетом и при изменении долготы перигелия от 135° (самый теплый период) до 270° (самый холодный период) в отсутствие механизма обратной связи. Периоды оледенения соответствуют орбитам с большим эксцентриситетом. Добавим, что размах в периоде изменения наклона эклиптики может явиться важным фактором, влияющим на долгопериодные вариации температуры на Земле.

1. ВВЕДЕНИЕ

Теория климата, предложенная Миланковичем [1], в последнее время получила всеобщее признание как теория долгопериодных вариаций климата. Научные исследования по климатической программе CLIMAP, особенно работы Хейса и др. [2], показали, что некоторые из повторяющихся циклических климатических флуктуаций связаны с вековыми вариациями земной орбиты. Спектральные оценки временных рядов температур

F. B. House. Dept. of Physics and Atmospheric Science, Drexel University, Philadelphia, PA 19104 USA.

ассоциируются с циклом прецессии 21 000 лет и с циклом наклона орбиты Земли 41 000 лет. Кроме того, они показали, что более половины отклонений связаны с изменениями эксцентриситета орбиты, которые имеют период около 100 000 лет. Миланкович рассматривает вариации эксцентриситета только как модулятор амплитуды цикла изменений прецессии, влияющих в свою очередь на зимне-летнюю вариацию инсоляции на данной широте. Как указывал Вигли [3], для того чтобы изменения эксцентриситета были существенными, необходим нелинейный отклик системы Земля—атмосфера на эти изменения эксцентриситета, поскольку годовая вариация инсоляции на данной широте практически постоянна для любого эксцентриситета.

Таким важным нелинейным свойством системы Земля—атмосфера может быть зависимость излучательной способности от четвертой степени температуры. Эта зависимость может быть описана законом Стефана—Больцмана $W_e = \sigma T_e^4$. Здесь представляет интерес дифференциальная форма этого закона $dT_e = dW_e / 4\sigma T_e^3$, которая показывает, что изменения температуры dT_e обратно пропорциональны третьей степени температуры. Чтобы проиллюстрировать значение этого свойства, проведем мысленный эксперимент. Положим, что требуется компенсировать изменение излучательной способности при временном увеличении инсоляции в некоторый момент времени. Соответствующее увеличение температуры будет зависеть от абсолютной температуры системы в тот же самый момент времени, причем это увеличение будет тем больше, чем ниже температура, и тем меньше, чем она выше. Таким образом, вариации инсоляции в течение года будут проявляться в вариациях температуры системы и притом нелинейным образом, зависящим от абсолютной температуры системы (или сезона года) в данный момент времени.

В этой статье рассматриваются климатические отклонения от существующего значения температуры поверхности для различных распределений инсоляции. Для предсказания ответной реакции системы в другой момент времени использовались расчеты по стационарной эмпирической модели, основанной на наблюдаемой в настоящее время реакции земной атмосферы. Для установления функциональной зависимости между ответной реакцией системы и месячным распределением инсоляции использовались спутниковые наблюдения величины отраженной радиации. В настоящей работе изучалось следствие только линейной зависимости излучательной способности от температуры и ее связь с изменением температуры поверхности.

2. ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Суммарная радиация, приходящаяся на единицу поверхности, на верхней границе атмосферы для некоторого месяца и области широт записывается в виде

$$Q_n = H_s - W_r - W_e,$$

где Q_n — суммарный приток тепла, H_s — инсоляция, W_r — величина отраженной радиации и W_e — величина излучения. Q_n представляет собой также сумму оттока и накопления тепла N в единичном столбе атмосферы, ограниченном снизу некоторым уровнем под поверхностью, на котором энергетический поток вызван только геотермальной составляющей, а сверху — верхней границей атмосферы (обычно 30 км). Если Q_n положителен, то избыток энергии запасается внутри этого столба или передается в соседние столбы атмосферы. Решая приведенное выше уравнение для излучения, получим

$$W_e = H_s - W_r - N. \quad (1)$$

Таким образом, величина W_e вычисляется по модели, удовлетворяющей условию энергетического баланса. Величина H_s вычисляется для определенного наклона, эксцентриситета и долготы перигелия орбиты Земли при солнечной постоянной равной 1360 Вт/м^2 . Принято, что в настоящий момент N имеет значение Q_n , наблюдаемое с помощью спутников по данным [4—7].

В уравнении (1) W_r есть отклик Земли при заданном распределении инсоляции. Его величина определяется из эмпирического уравнения множественной регрессии:

$$W_r = a_1 + a_2(H_s) + a_3(-\nabla H_s) + a_4(\dot{H}_s).$$

Здесь W_r зависит от величины инсоляции H_s на данной широте, ее меридионального градиента $(-\nabla H_s)$ и ее производной по времени (\dot{H}_s) . Коэффициенты регрессии определялись для широтного интервала в 10° по спутниковым наблюдениям [4—7] для значений инсоляции, вычисленных для сегодняшней орбиты Земли.

Температура поверхности T_s на данной широте рассчитывалась по величине W_e из (1) с помощью уравнения линейной регрессии, связывающего тепловое излучение поверхности σT_s^4 и наблюдаемое излучение, т. е.

$$T_s = [(c_0 + c_1 W_e)/\sigma]^{1/4}.$$

Для определения коэффициентов регрессии использовались данные среднемесячных температур [8—9] в сочетании со спутнико-

выми наблюдениями. Средняя температура поверхности \bar{T}_s на данной широте рассчитывалась по месячным температурам с помощью взвешенного усреднения по времени.

Представляет интерес исследовать изменения среднегодовой температуры $\Delta\bar{T}_s(t)$ со временем t в зависимости от изменения конфигурации орбиты:

$$\Delta\bar{T}_s(t) = \bar{T}_s(t) - \bar{T}_s(\text{теперь}).$$

В дальнейшем для краткости изменения среднегодовой температуры будем обозначать как $\Delta\bar{T}_s$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчеты $\Delta\bar{T}_s$ были проведены для области значений наклона орбиты ($\epsilon = 22,2 \div 24,4^\circ$), эксцентриситета ($e = 0 \div 0,06$) и долготы перигелия ($\Pi = 0 \div 360^\circ$). Результаты этих расчетов подтвердили чувствительность температурных вариаций к элементам орбиты, что открывает возможность предсказания $\Delta\bar{T}_s$ по временным вариациям элементов орбиты, рассчитанных Бергером [10].

На рис. 1 представлены результаты расчетов $\Delta\bar{T}_s$ для четырех широт в зависимости от наклона круговой ($e=0$) орбиты Земли. Изменение температуры максимально на широте $75^\circ N$ и составляет $3,5 K$ для крайних значений наклона в выбранном диапазоне. Для более низких широт чувствительность изменения температуры в зависимости от наклона орбиты постепенно падает и становится нулевой на $47^\circ N$, как указывалось Миланковичем [1], а затем наклон кривой становится отрицательным. Отметим, что величина $\Delta\bar{T}_s$ опять становится положительной в тропической зоне ($0-20^\circ N$), которая на рис. 1 не показана.

На рис. 2 представлены изменения $\Delta\bar{T}_s$ на широтах 45 и $55^\circ N$ за период цикла прецессии для максимального наклона

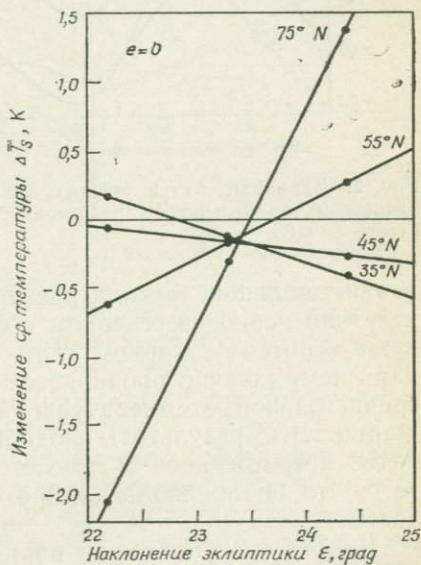


Рис. 1. Вариации $\Delta\bar{T}_s$ в зависимости от наклона эклиптики для различных широт северного полушария (нулевой эксцентриситет).

24,4°. При этом, чтобы выделить максимальный эффект, выбиралось наибольшее значение эксцентриситета ($e=0,06$). Для широты 55°N изменение температуры составляет около 1,7 К и становится максимальным (около 1,9 К) на широте 45°N. Изменения $\Delta\bar{T}_s$ носят синусоидальный характер, не вполне симметричный относительно угла перигелия П. Более высокие температуры приходится на значение $\Pi=135^\circ$, в то время как более низкие имеют место при угле перигелия $\Pi=270^\circ$. Сдвиг от $\Pi=90^\circ$ к $\Pi=135^\circ$ обусловлен нелинейной зависимостью альбедо

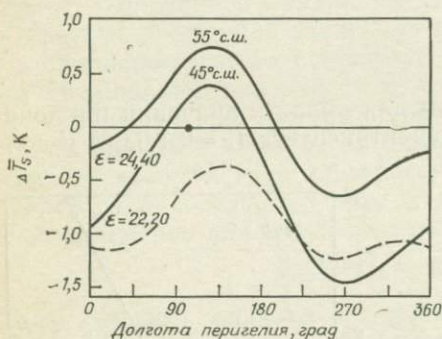


Рис. 2. Вариации $\Delta\bar{T}_s$ в течение цикла прецессии для 45 и 55° N при эксцентриситете $e=0,06$.

Земли от инсоляции в течение года. Для сравнения приведена пунктирная кривая, изображающая изменение температуры на широте 55°N для низкого значения наклона 22,2°. Полное изменение $\Delta\bar{T}_s$ составляет ~1,1 К, понижение температуры соответствует более низким значениям наклона.

Рис. 2. Вариации $\Delta\bar{T}_s$ в течение цикла прецессии для 45 и 55° N при эксцентриситете $e=0,06$.

Рис. 3. Вариации температуры $\Delta\bar{T}_s$ в зависимости от наклона орбиты. На графике для сравнения даны аналогичные вариации для круговой орбиты $e=0$. Максимально высокие значения $\Delta\bar{T}_s$ при $\Pi=135^\circ$ примерно на 0,4 К больше, чем для круговой орбиты, а наиболее низкие значения примерно на 0,9 К меньше. Сплошные линии указывают на диапазон изменения температуры равный 1,3 К. При суммарном охлаждении, обусловленном наибольшим эксцентриситетом, температура, усредненная по циклу прецессии, имеет значение на 0,4—0,5 К ниже, чем наблюдаемое в настоящее время.

Рис. 3. Вариации температуры $\Delta\bar{T}_s$ в зависимости от наклона орбиты. На графике для сравнения даны аналогичные вариации для круговой орбиты $e=0$. Максимально высокие значения $\Delta\bar{T}_s$ при $\Pi=135^\circ$ примерно на 0,4 К больше, чем для круговой орбиты, а наиболее низкие значения примерно на 0,9 К меньше. Сплошные линии указывают на диапазон изменения температуры равный 1,3 К. При суммарном охлаждении, обусловленном наибольшим эксцентриситетом, температура, усредненная по циклу прецессии, имеет значение на 0,4—0,5 К ниже, чем наблюдаемое в настоящее время.

На рис. 4 показан временной ход $\Delta\bar{T}_s$ за период от 500 тыс. лет до настоящего времени (д. н.) и на 100 тыс. лет вперед. Эти данные состоят из усредненных по площади в широтной области 40—70°N вариаций температуры и могут быть представлены только как температурные отклонения от существующих величин (без учета влияния альbedo как механизма обратной связи). Следует обсудить некоторые характерные особенности этих вариаций. Основная составляющая имеет период в 41 тыс. лет и связана с циклическим изменением наклона орбиты; она наиболее ярко проявляется в области 55—70°N. Осцилляция более высокой частоты с возрастающей или убывающей амплитудой (см. вариации в эпоху от 230 тыс. лет до 180 тыс. лет д. н.) соответствуют циклу прецессии с амплитудной модуляцией из-за изменений эксцентриситета. Наиболее высокое значение $\Delta\bar{T}_s$, равное 0,56 К, имело место около 207 тыс. лет тому назад, наиболее низкое (—0,95 К) 198 тыс. лет тому назад. Максимальные пределы изменения $\Delta\bar{T}_s$ в то время достигали величины 1,5 К.

При расчетах обнаружены интересные особенности изменения температуры, связанные с вариациями угла наклона орбиты от минимального до максимального. На рис. 4 изменения этих предельных значений можно отметить соответствующими огибающими. Например, максимальный перепад температур происходил между 250 тыс. и 200 тыс. годами д. н., и это связано с изменением наклона орбиты на 2,3°. Кроме того, эксцентриситет в этот период равнялся 0,05, что явилось причиной усиления охлаждения. Отсюда видно, что как величина эксцентриситета, так и изменение наклона могут явиться важными факторами, влияющими на долгопериодные вариации температуры Земли.

Величина $\Delta\bar{T}_s$ сама по себе не определяет температурные вариации, связанные с ледниковыми периодами. Обнаружено,

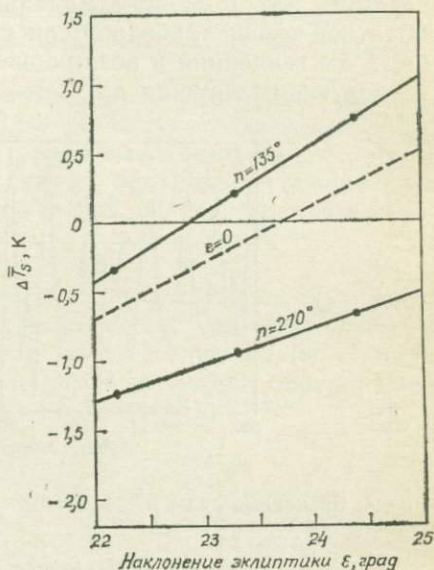


Рис. 3. Вариации наклона эклиптики для самого большого и самого малого изменения температур на широте 55°N.

что периоды оледенения соответствуют условиям большого эксцентриситета, что приводит к большому охлаждению в течение каждого цикла прецессии. Кроме того, было замечено, что в центрах континентов вариации $\Delta \bar{T}_s$ могут быть на 75 % больше, чем представленные в расчетах на рис. 4. Следует подчеркнуть, что в данную модель не включен механизм влияния обратной связи альbedo. Если бы этот механизм был учтен, то была бы тенденция к возникновению кумулятивного добавления к следующим друг за другом во времени температурным изме-

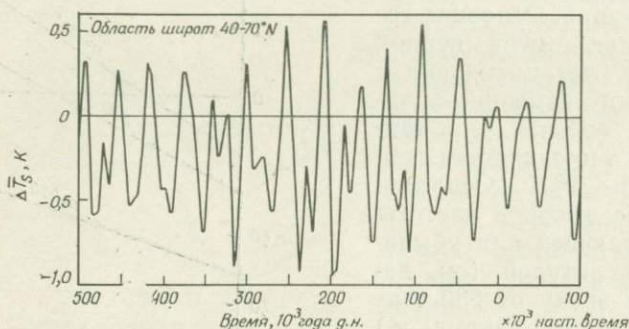


Рис. 4. Временные ряды $\Delta \bar{T}_s$ в течение периода в 600 тыс. лет.

нениям, а также к появлению фазовых сдвигов между максимальными и минимальными значениями по сравнению с представленными на рис. 4.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана эмпирическая модель для определения реакции земной атмосферы на изменения в распределении инсоляции, использующая спутниковые наблюдения отраженной радиации. Эта модель исследует нелинейную зависимость излучательной способности от температуры и ее связь с температурой поверхности. Представлены количественные исследования отклонений средней температуры от ее сегодняшних значений в зависимости от изменения параметров орбиты Земли. Эти результаты показывают 1) на широтах севернее 50° имеются изменения температуры в диапазоне от 1 до более чем 3 К; 2) широты 55 и 45°N более чувствительны к изменениям эксцентриситета, чем другие; за период цикла прецессии $\Delta \bar{T}_s$ изменяется в интервале от 1,7 до 1,9 К; 3) максимальное значение эксцентриситета 0,06 вызывает суммарное изменение около $-0,5$ К; 4) результаты соответствуют гипотезам Миланковича, за исключением

того, что максимальный эффект соответствует прохождению Земли через перигелий, когда в северном полушарии не зима, а лето; 5) диапазон изменения $\Delta \bar{T}_s$ от 0,56 до $-0,95$ К в течение периода 600 тыс. лет основан на временных изменениях параметров орбиты и 6) изменения наклона орбиты так же, как и эксцентриситета, могут явиться важными факторами, влияющими на долгопериодные вариации температуры на поверхности Земли.

Величины предсказанных изменений температуры раскрывают значение нелинейного характера излучательной способности Земли. В Дрекселе сейчас проводится тщательная работа по изучению нелинейного механизма обратной связи, обусловленной альбедо, который позволяет предсказать временные изменения температуры.

Выражаю особую благодарность Карлу Генферу — студенту выпускного курса университета в Дрекселе за составление и отладку программ, относящихся к этому исследованию. Данная работа поддерживалась Национальной службой окружающей среды, субсидирована NOAA № 04-6-158-44061.

Литература

1. *Milankovitch M.* Canon of Insolation and Ice-age Problem, translated from German, U. S. Dept. of Commerce, CFSTI, Springfield, VA (Belgrade), 1941.
2. *Hays J., Imbrie J., Shackleton N. J.* Science, **194**, 4270, 1976.
3. *Wigley T. M. L.* Nature, **264**, 629, 1976.
4. *Vonder Haar T. H., Suomi V. E. J.* Atmos. Sci., (3), **28**, 305, 1971.
5. *Raschke E. T., Vonder Haar T. H., Bandeen W. R., Pasternak M. J.* Atmos. Sci., **30**, 341, 1973.
6. *House F. B.*, unpublished compilation of ESSA 7 satellite earth radiation budget observations, 1978.
7. *Smith W. L., Hickey J., Howell H. B., Jacobowitz H., Hilleary D. T., Drummond A. J.* Appl. Optics, **16**, 306, 1977.
8. *Jenne R. L., van Loon H., Taljaard J. J., Crutcher H. L.* NOTOS, **17**, 35, 1968.
9. *Jenne R. L.* Zonal Means of Climatological Analyses of the Northern Hemisphere, available at the NCAR data bank, 1978.
10. *Berger A.* Astron. and Astrophys., **51**, 127, 1976.

СВЯЗЬ МЕЖДУ СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ, ИОНОСФЕРОЙ И МАГНИТОСФЕРОЙ

Е. У. Хоунс мл.

Солнечный ветер, набегаая на магнитосферу, частично передает ей свою массу, импульс и энергию. Это происходит во внешней области магнитосферы — пограничном слое как путем прямого проникновения плазмы солнечного ветра в замкнутые силовые трубки пограничного слоя, так и путем пересоединения силовых линий межпланетного магнитного поля (ММП) с магнитным полем Земли. Последний механизм представляется основным в случае, когда ММП имеет заметную южную компоненту; обсуждаются некоторые наблюдения, демонстрирующие его важность. Первый механизм может быть ответствен за постоянное существование геомагнитного хвоста даже в те продолжительные периоды, когда ММП направлено на север. При любом механизме взаимодействия основной процесс, передача импульса, сопровождается электрической поляризацией областей взаимодействия. Поляризационные заряды растекаются, создавая ток деполяризации, который течет вдоль силовых линий магнитного поля в ионосферу, где передает импульс ионосферной плазме. В то же время обмен импульсом в переходном слое приводит к вытягиванию силовых линий в этой области вдоль по потоку — образованию геомагнитного хвоста, резервуара запасенной магнитной энергии; часто этот резервуар высвобождает накопленную энергию на ночной стороне Земли, создавая суббури. Недавние наблюдения приводят к заключению, что продольные токи, текущие вдоль магнитного поля из области взаимодействия, создают на высотах от 1 до $2 R_E$ продольные электрические поля и что эти поля ответственны за ускорение частиц, образующих авроральные дуги.

1. ВВЕДЕНИЕ

Предметом данной статьи является описание воздействия частиц, испускаемых Солнцем, на земную магнитосферу, а затем — на ионосферу. Частицы, испускаемые Солнцем, можно разделить на две категории — низкоэнергичные электроны и ионы, которые образуют плазму солнечного ветра, и электроны

E. W. Hones, Jr. University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, NM 87545 USA.

и ионы высоких энергий, которые выбрасываются из солнечных вспышек и активных областей. Частицы плазмы солнечного ветра движутся совместно и взаимодействуют с магнитосферой как сплошная среда. Высокоэнергичные частицы, имеющие значительно меньшую концентрацию, чем частицы плазмы, движутся независимо друг от друга и оказывают незначительное воздействие на электрические свойства окружающей среды. В данной статье рассматривается взаимодействие только с солнечным ветром.

2. ПЕРЕНОС ПЛАЗМЫ, ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА ИЗ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МАГНИТОСФЕРУ

В этом разделе мы опишем два различных (но действующих совместно) механизма, которые считаются ответственными за перенос плазмы, энергии и импульса из солнечного ветра в магнитосферу. Один из них — прямое (возможно, диффузионное) проникновение солнечной плазмы в «пограничный слой магнитосферы», состоящий из замкнутых магнитных трубок. Другой — пересоединение силовых линий магнитного поля солнечного ветра с силовыми линиями поля Земли. Имеющиеся в настоящее время данные наблюдений не позволяют количественно определить относительную важность этих двух механизмов. Скорость переноса за счет первого из механизмов может зависеть только от скорости переноса импульса (т. е. динамического давления) солнечного ветра; это дает возможность оценить минимальное значение, ниже которого никогда не падает полная скорость переноса. Скорость переноса за счет второго механизма зависит от магнитного поля солнечного ветра и сильно изменчива. Этот механизм, возможно, является основным в периоды геомагнитных возмущений.

2.1. ПЕРЕНОС ЧЕРЕЗ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Частица, движущаяся со скоростью \mathbf{V} в магнитном поле \mathbf{B} , испытывает действие силы Лоренца

$$\mathbf{F}_L = q\mathbf{V} \times \mathbf{B},$$

которая перпендикулярна \mathbf{B} и имеет противоположные направления для зарядов противоположных знаков. Это показано в левой верхней части рис. 1, где магнитное поле считается направленным из плоскости рисунка, а электроны и протоны отклоняются соответственно влево и вправо. В верхней правой части рис. 1 показано, как за счет этого явления возникает электрический ток. Плазма из источника плазмы нагнетается в магнитное

поле **B**. Электроны, отклоняясь, накапливаются на левой границе области, занятой магнитным полем **B**, а отклонившиеся протоны — на правой. В отсутствие внешнего проводящего контура такой «ток поляризации» за счет отклонившихся частиц

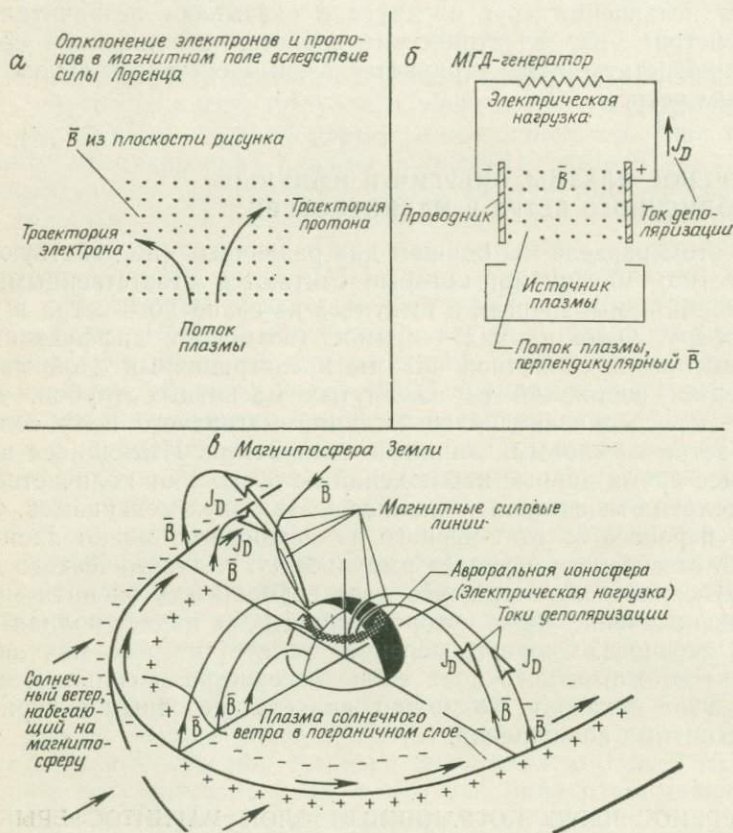


Рис. 1. Вверху слева: криволинейные траектории электронов в магнитном поле. Вверху справа: электростатическая поляризация плазмы, вынуждаемой двигаться поперек магнитного поля, и ток деполаризации из плазмы. Внизу: поляризация плазмы в пограничном слое магнитосферы и возникающие токи деполаризации, текущие в ионосферу Земли.

должен быстро привести к образованию слоев пространственного заряда на границах области, занятой магнитным полем; их электрическое поле должно в точности компенсировать силу Лоренца, действующую на последующие частицы, и эти частицы должны тогда идти строго поперек поля, не испытывая никакого

отклонения. Внешний контур, показанный на рисунке, обеспечивает возможность протекания «тока деполяризации», который будет стремиться нейтрализовать накопленный заряд. Отметим, что ток поляризации \mathbf{J}_p , текущий слева направо в области, занятой магнитным полем, приводит к появлению силы $\mathbf{J}_p \times \mathbf{B}$ (направленной на рисунке вниз), которая противоположна направлению потока плазмы из источника, т. е. за счет взаимодействия с полем импульс плазмы уменьшается. Отметим также, что если бы область магнитного поля простиралась настолько, что заключала в себя «электрическую нагрузку», или нагрузка была бы сдвинута так, чтобы находиться внутри изображенного поля \mathbf{B} (но вне области потока плазмы, т. е. перед плоскостью рисунка или за ней), то деполяризационный ток \mathbf{J}_D , текущий справа налево через область, занятую полем, привел бы к возникновению силы $\mathbf{J}_D \times \mathbf{B}$ (направленной на рисунке вверх), которая имеет то же направление, что и поток плазмы из источника. Таким образом, импульс, потерянный втекающей плазмой, передается электрической нагрузке. Лабораторные эксперименты, демонстрирующие такие процессы переноса импульса в замагниченной плазме, были недавно осуществлены Бейкером и Хаммелом [1].

Нижняя часть рис. 1 иллюстрирует применение изложенных выше принципов для случая потери импульса солнечным ветром у экваториального сектора магнитосферы. (Эти же принципы применимы и на других участках поверхности магнитосферы, а также и при действии других процессов, речь о которых пойдет ниже.) Приборами на спутниках зарегистрировано, что плазма солнечного ветра проникает через внешнюю границу магнитосферы (магнитопаузу), заполняя область шириной от нескольких сотен до тысяч километров, и там ее параметры близки к параметрам плазмы солнечного ветра. Эта область названа пограничным слоем, она выделена на рис. 1. Плазма в пограничном слое течет, как показано стрелками, внутрь и приблизительно по касательной по отношению к магнитопаузе. Уменьшающаяся плотность точек соответствует снижению плотности плазмы по мере проникновения в магнитосферу. Наблюдалось также снижение скорости потока плазмы по мере его проникновения. Таким образом, при углублении внутрь магнитосферы уменьшается плотность импульса плазмы солнечного ветра, проникающей через границу. Далее Истмэн и др. [4] и Палмер и Хоунс [5] обнаружили, что на низких широтах силовые линии, проходящие через пограничный слой, замкнуты (т. е. обоими концами упираются в Землю). Таким образом, в пограничном слое должно существовать электрическое поле поляризации, позволяющее плазме течь поперек магнитного поля. Знаки слоев заряда, образующих электрическое поле, ука-

заны на рис. 1 значками (+) и (—); видно, что слои имеют противоположную ориентацию относительно магнитопаузы на утренней (слева) и вечерней (справа) сторонах магнитосферы.

Помимо упоминавшегося выше уменьшения плотности импульса плазмы переходного слоя по мере углубления в магнитосферу, дополнительным признаком того, что плазма передает свой импульс магнитосфере, является сильное вытягивание силовых линий пограничного слоя на ночную сторону, показывающее, что магнитное поле оказывает сопротивление потоку плазмы. Значит, существует *поляризационный ток*, текущий поперек пограничного слоя и направленный внутрь на утренней стороне и наружу на вечерней, так что сила $\mathbf{J}_p \times \mathbf{V}$ на обеих сторонах направлена к Солнцу. Эти токи должны быть замкнуты за счет *токов деполяризации* \mathbf{J}_D , втекающих в авроральную магнитосферу вдоль магнитных силовых линий по направлениям, показанным на рис. 1 стрелками на отдельных силовых линиях. Достигая ионосферы с хорошей проводимостью, эти токи деполяризации текут в ней перпендикулярно силовым линиям. За счет силы $\mathbf{J}_D \times \mathbf{V}$ они передают ионосферной плазме часть импульса плазмы пограничного слоя. Часть импульса поглощается также непосредственно магнитным полем пограничного слоя, поскольку сила $\mathbf{J}_p \times \mathbf{V}$, вызванная поляризационным током, вытягивает замкнутые силовые трубки назад вдоль флангов магнитосферы, увеличивая поток магнитного поля в геомагнитном хвосте.

Рост магнитного потока в хвосте означает накопление в нем энергии. Мы увидим, что процесс магнитного пересоединения, который будет обсуждаться ниже, увеличивает магнитный поток в хвосте несколько другим способом. Важным следствием этих процессов накопления является высвобождение запасенной в хвосте магнитной энергии, что мы обсудим ниже.

2.2. ПЕРЕНОС ЗА СЧЕТ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МАГНИТОСФЕРЫ

Солнечный ветер пронизан силовыми линиями магнитного поля, которые он вытягивает из Солнца. Это межпланетное магнитное поле (ММП), хотя плотность его энергии и составляет лишь около 1% от полной плотности энергии солнечного ветра, сильно влияет на проникновение плазмы солнечного ветра, импульса и энергии в магнитосферу. Считают, что это происходит при его пересоединении с магнитным полем Земли. Таким образом возникает путь для прямого проникновения плазмы солнечного ветра в некоторые области магнитосферы. Столь же важно, что это пересоединение межпланетного маг-

нитного поля с полем Земли делает возможным передачу электрических полей и магнитного давления из солнечного ветра непосредственно в магнитосферу: таким образом, импульс плазмы солнечного ветра, обтекающего магнитосферу, может быть сообщен ионосфере так же, как это было описано выше при рассмотрении процессов в пограничном слое.

Проведенное выше обсуждение показало, что основой взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы является передача магнитосфере импульса от солнечного ветра. Существенно, что процесс переноса импульса может проходить одновременно двумя путями: а) сила, возникающая из-за тока деполяризации, текущего из области взаимодействия, передает импульс ионосфере и б) ток поляризации, протекающий внутри области взаимодействия, создает сопротивление набегающему потоку плазмы, так что магнитные силовые линии вытягиваются в хвост, что приводит к накоплению энергии. Если бы протекание тока приостановилось, т. е. если бы ионосфера внезапно стала непроводящей, то область взаимодействия очень быстро стала бы полностью поляризованной, возникшее в ней электростатическое поле $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ в точности компенсировало бы силу Лоренца, действующую на частицы плазмы. Тогда поток плазмы прошел бы сквозь магнитное поле беспрепятственно и не существовало бы переноса импульса.

2.3. ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Геомагнитная активность — это явление, которое наиболее часто используют для характеристики взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой. Обычно активность характеризуется некоторым «индексом», являющимся мерой магнитной возмущенности, измеряемым на группе избранных обсерваторий. Поскольку основу взаимодействия составляет перенос импульса от солнечного ветра в магнитосферу, можно ожидать, что геомагнитная активность должна возрастать при возрастании потока импульса солнечного ветра. Если существуют другие параметры солнечного ветра, увеличивающие действие на магнитосферу потока импульса солнечного ветра, то при подходящем их изменении можно ожидать роста магнитной активности, соответствующей данному потоку импульса. Кратко упомянем о результатах одного из многих исследований, в которых геомагнитная активность сопоставлялась с различными параметрами солнечного ветра.

Свалгаард [6] сопоставил *ат*-индекс, приближенный индекс глобальной активности, с несколькими параметрами солнечного ветра, полученными из измерений, проводившихся в течение

почти полного солнечного цикла. В этом исследовании отдельно обрабатывались следующие параметры: поток импульса солнечного ветра ($\propto nV^2$), где n — концентрация ионов солнечного ветра; BV — приток межпланетного магнитного поля на единицу длины поперек фронта магнитосферы; угол α , который составляет межпланетное магнитное поле с земным полем в лобовой части магнитосферы; изменчивость направления ММП; наклонение оси земного диполя к линии Земля—Солнце. Свалгаард обнаружил, что am изменяется как $(nV^2)^{1/3}$ и линейно в зависимости от BV . Он также обнаружил сильную зависимость от α и более слабую зависимость от изменчивости ММП. Была также найдена слабая, но постоянная тенденция к увеличению am в тех случаях, когда земной диполь был перпендикулярен к направлению потока солнечного ветра.

Такая зависимость геомагнитной активности от α , что большая активность связывалась с $\alpha > 90^\circ$ (т. е. ММП, направленным на юг), указанная в исследовании Свалгаарда, была впервые обнаружена Фэрфилдом и Кахиллом [7] и затем доказана во множестве других исследований текущего десятилетия. Разумеется, она была интерпретирована всеми как сильный аргумент в поддержку концепции пересоединения ММП и земного магнитного поля. Действительно, простая геометрическая концепция, что пересоединение этих полей происходит, причем осуществляется более эффективно при увеличении южной компоненты ММП, имела большой успех при объяснении множества наблюдений. Некоторые из них стоит здесь обсудить.

ММП обычно представляет собой два или четыре сектора, вращающихся вместе с Солнцем и имеющих противоположно направленные поля, лежащие приблизительно в плоскости эклиптики [8]. Одни из секторов, обычно называемые положительными (+), содержат поле, направленное от Солнца вдоль спирали «садового шланга» под углом в среднем 135° к востоку относительно Солнца. Другие секторы, называемые отрицательными (—), содержат поле, направленное по спирали «садового шланга» под средним углом 45° к западу относительно Солнца. Поле в этих секторах имеет также случайно изменяющиеся южные и северные компоненты, но в среднем они близки к нулю. Наклон земной оси к плоскости эклиптики в $23,5^\circ$ приводит к тому, что поле в отрицательных секторах ММП приобретает отрицательную (южную) компоненту относительно поля Земли вблизи весеннего равноденствия и северную компоненту — вблизи осеннего равноденствия. В те же сезоны, но для случая положительных секторов, знак полярности изменяется. Вблизи солнцестояний не возникает относительных южных или северных компонент. Рассел и Макферрон [9] отметили, что появление в равноденствии благодаря этому эф-

фекту южной компоненты может быть причиной давно известных равноденственных максимумов геомагнитной активности. Эта точка зрения была впоследствии усилена Пауликасом и Блейком [10], в наблюдениях которых потоки электронов на геосинхронной орбите, являющиеся индикатором геомагнитной активности, коррелировали с прохождением секторных границ ММП. Потоки электронов осенью были наиболее высокими для положительных секторов, а весной — для отрицательных. Дальнейшая поддержка этой точки зрения исходила от Шили и др. [11], исследовавших корреляцию геомагнитной активности со скоростью солнечного ветра. Они обнаружили (и это не удивительно), что активность возрастала с ростом скорости ветра. Кроме того, при данной скорости солнечного ветра активность была наибольшей, когда Земля находилась в отрицательных секторах весной и в положительных секторах осенью. Эти результаты Шили и др. [11] показаны на рис. 2.

Чтобы произошло пересоединение, ММП не обязано быть в точности антипараллельно полю Земли. Были разработаны теории (например, Мозер и др. [12]), которые предсказывают, насколько эффективно будет произвольно ориентированное ММП пересоединяться с земным полем. Некоторые наблюдения наводили на мысль, что y -компонента ММП (т. е. компонента, перпендикулярная оси Солнце—Земля) сильно влияет если не на величину, то на характер взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы. Свалгаард [13, 14] из анализа наземных магнитограмм сделал вывод, что ионосферные токи текут вокруг каждого из магнитных полюсов вдоль инвариантных широт на расстоянии $\sim 10^\circ$ от полюсов. Если смотреть со стороны полюсов, то направление токов было против часовой стрелки, когда сектор ММП был положительным, и по часовой стрелке — для отрицательных секторов. Это явление оказалось настолько устойчивым, что Свалгаард [15] использовал его для изучения поведения длиннопериодных вариаций секторной структуры в течение четырех солнечных циклов. Фрис-Кристенсен и др. [16], также изучавшие наземные магнитограммы, смогли показать, что с этими токовыми системами связана именно y -компонента ММП, а не x -компонента (в положительных секторах y -компонента направлена на 90° к востоку от Солнца, а в отрицательных — на 90° к западу). Независимо Хеппнер [17] обнаружил при измерениях на спутнике с полярной орбитой, что над полярными шапками электрическое поле, направленное с востока на запад, наиболее сильно на восточной стороне северной полярной шапки и на западной стороне южной полярной шапки в те периоды, когда Земля находится в положительном секторе; ситуация изменялась на противоположную, когда Земля была в отрицательном секторе. Мозер и др. [12] обна-

ружили аналогичную закономерность в измерениях электрических полей в полярной шапке на воздушных шарах. Они сделали вывод, что магнитные эффекты, изучавшиеся Свалгаар-

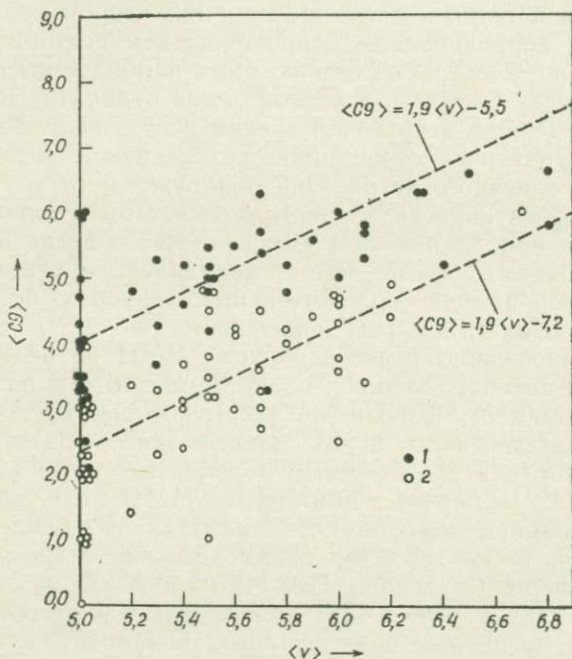


Рис. 2. Средние значения индекса $C9$ при прохождении потока солнечного ветра в зависимости от средней скорости этого потока в единицах 100 км/с . Темные кружки соответствуют данным, полученным в отрицательных секторах ММП весной и в положительных секторах осенью — в условиях, при которых можно ожидать чисто южную компоненту ММП. Светлые кружки соответствуют данным, полученным в положительных секторах ММП весной и в отрицательных секторах осенью — в условиях, которые должны давать чисто отрицательную компоненту ММП [11]. 1 — благоприятная четверть, (+) ММП весной, (—) ММП осенью. 2 — неблагоприятная четверть, (+) ММП весной, (—) ММП осенью.

дом [13, 14] и Фрис-Кристенсенем и др. [16], могут быть приписаны холловским токам, текущим под воздействием асимметричных электрических полей в полярной шапке, и что все эти наблюдения можно объяснить в рамках модели магнитного пересоединения, показанной на рис. 3. Линия, на которой происходит пересоединение межпланетного и земного полей, наклонена под углом, зависящим от направления межпланетного поля. Эта линия находится в плоскости эклиптики в том случае, когда ММП имеет чисто южное направление, но она

наклонена так, как показано на рисунке, в случае чисто положительного или чисто отрицательного направления ММП по оси y . Светлые стрелки указывают получающиеся при этом направления (соответствующие наиболее сильному электрическому полю), в которых ток в полярных шапках имеет тенденцию быть наиболее сильным над восточной стороной северной полярной шапки для $V_y > 0$ и над западной стороной для $V_y < 0$.

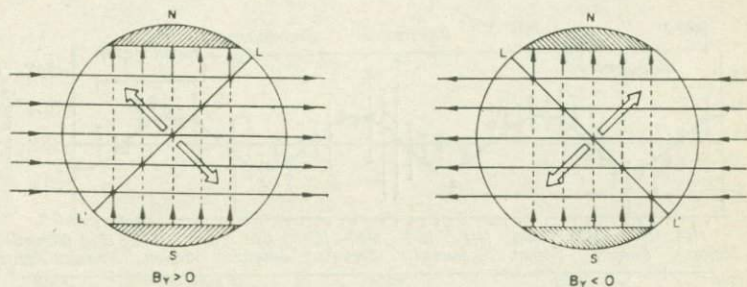


Рис. 3. Вид со стороны Солнца на конвекцию у магнитопаузы вследствие предполагаемого пересоединения между азимутальным межпланетным магнитным полем и геомагнитным полем для случаев $V_y > 0$ и $V_y < 0$. Сплошные линии соответствуют силовым линиям межпланетного магнитного поля. Пунктирные линии соответствуют силовым линиям геомагнитного поля у магнитопаузы. Заштрихованные участки — полярные шапки [12].

Последний вопрос, который мы обсудим в этом разделе, — это дипольная компонента солнечного магнитного поля, наблюдаемая у нее 22-летняя цикличность инверсии (т. е. магнитный солнечный цикл) и ее влияние на геомагнитную активность. Наблюдаемую 22-летнюю цикличность геомагнитной активности можно объяснить как еще одно следствие пересоединения ММП и поля Земли, следствие еще более тонкое по своему происхождению, чем только что обсуждавшееся. При изучении спутниковых данных о ММП за период 1962—1968 гг. Розенберг и Колеман [18] обнаружили отчетливые признаки преобладания одной полярности магнитного поля. Преобладающим было направление поля внутрь (к Солнцу) на гелиографических широтах, лежащих выше экваториальной плоскости. Анализ [18] иллюстрирует рис. 4. Точками показано число дней с отрицательной полярностью для каждого оборота Солнца. Эти числа являются наибольшими вблизи сентября каждого года, когда Земля находится на самой высокой гелиографической широте ($7,3^\circ$). Эти направления вполне соответствовали дипольной компоненте магнитного поля Солнца, найденной из магнитограмм полярных районов, полученных за тот же период.

Последнее указывало, что дипольная компонента поля Солнца была направлена в северной полусфере внутрь, а в южной полусфере — наружу от Солнца со времени максимума 19 цикла солнечной активности в 1958 г.

Уилкоккс и Шерер [19] расширили этот анализ на четыре солнечных цикла (1926—1971), используя полученную Свалгаардом [15] полярность ММП. Их результаты в общем находились в согласии с результатами [18]. Более того, поскольку

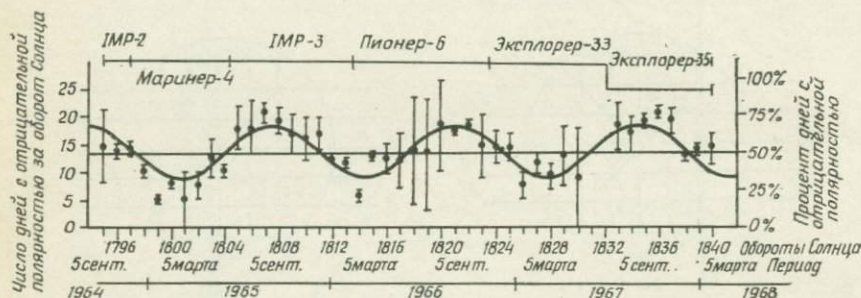


Рис. 4. Полярность ММП (положительная или отрицательная). Для каждого оборота Солнца нижние черточки на вертикальных отрезках соответствуют действительному количеству дней с отрицательной полярностью. Верхние черточки соответствуют величине 27 минус количество дней с положительной полярностью. Расстояние между черточками — это количество дней, для которых данные отсутствуют. Точка расположена посередине между черточками [20].

длительность периода, для которого они проводили свой анализ, была значительно больше, им удалось показать, что преобладающая полярность ММП изменяется примерно каждые 10 лет совместно с изменением полярности на Солнце. Полярность изменяется спустя примерно 2 года после максимума солнечной активности. Таким образом, поле над северной полусферой было направлено внутрь Солнца примерно с 1958 по 1971 г. (т. е. последнюю половину 19 цикла активности и первую половину 20 цикла). Оно было направлено наружу над северной полусферой в течение последней половины 20 цикла и в начале теперешнего, 21 цикла. Существование преобладающего направления поля наружу вблизи конца 20 и в начале 21 цикла было красиво показано в измерениях на ракете «Пионер-11» в области высоких северных гелиографических широт [20]. На северных широтах $\sim 16^\circ$ поле почти всегда было направлено наружу и были видны лишь слабые признаки секторных структур. Эти наблюдения наводят на мысль, что приблизительно в плоскости магнитного экватора Солнца существует волнистый слой с током, направленным по азимуту, разделяющий магнитные поля двух полусфер.

При изучении геомагнитной активности за 80-летний период с 1884 по 1964 г. Черноски [21] обнаружил 22-летний цикл, в котором пики активности приходились на последние половины четных циклов солнечных пятен и на первые половины

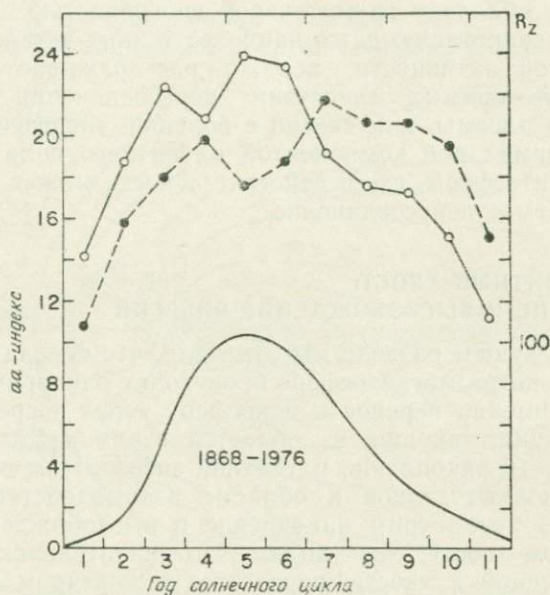


Рис. 5. Изменение среднегодовой величины геомагнитной активности как функция фазы солнечного цикла. Четные (черные кружки) и нечетные циклы (светлые кружки) рассмотрены отдельно. Внизу показано среднее число солнечных пятен для солнечных циклов с 1868 по 1976 г.— периода, для которого построены верхние кривые на рисунке [6].

для нечетных циклов. Свалгаард [6] недавно опубликовал еще одно такое же исследование, перекрывающее период 1868—1976 г., которое дало совершенно идентичные результаты, они изображены на рис. 5. Исследование Свалгаарда показывает, что 22-летний цикл геомагнитной активности можно представить себе следующим образом. В течение последних половин четных циклов и первых половин нечетных циклов направленность поля наружу от Солнца в северной полусфере и внутрь в южной полусфере приводит к образованию чисто южной компоненты (по отношению к полю Земли на фронте магнитопаузы) как вблизи весеннего равноденствия, когда Земля находится на самых южных гелиоцентрических широтах, так и вблизи осеннего равноденствия, когда Земля находится на

самых северных широтах. В течение чередующихся с ними 11-летних интервалов у Земли присутствует чисто северная компонента.

Мы закончим этот раздел предостережением, обращенным к читателю. Несмотря на то что концепция магнитного пересоединения обладает изумительной способностью давать логическую интерпретацию даже наиболее тонких деталей вариаций геомагнитной активности, все же настораживает отсутствие наблюдений прямых следствий пересоединения (например, ускоренной плазмы, или частиц с большой энергией или значительной нормальной компонентой магнитного поля) в лобовой части магнитосферы, где в действительности может иметь место предполагаемое пересоединение.

3. ГЕОМАГНИТНЫЙ ХВОСТ: НАКОПЛЕНИЕ И ВЫСВОБОЖДЕНИЕ ЭНЕРГИИ

В предыдущем разделе мы отмечали, что передача импульса солнечного ветра магнитосфере происходит одновременно двумя путями, а именно перенос в ионосферу через посредство токов деполяризации, текущих из областей взаимодействия, и перенос в хвост (и накопление магнитной энергии) за счет действия поляризационных токов в области взаимодействия. В этом разделе мы рассмотрим накопление и высвобождение энергии в магнитном хвосте. Мы увидим, что значительная доля энергии, запасенной в хвосте, передается в конечном счете ионосфере. В следующем разделе будет обсуждаться перенос в ионосферу из хвоста и из областей взаимодействия.

3.1. НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В МАГНИТНОМ ХВОСТЕ

Магнитный хвост имеет диаметр около $40R_E$ ($1R_E = 6370$ км) и, как считают, простирается на $500R_E$ или около этого вдоль по потоку солнечного ветра [22]. Магнитное поле Земли, существенно дипольное вплоть до геоцентрических расстояний $\sim 5R_E$, приобретает где-то между $6R_E$ и $10R_E$ хвостобразную, вытянутую форму. Вдоль боковых сторон магнитосферы поле также сильно вытянуто назад, и его конфигурация приближается к хвостобразной. В средней плоскости хвоста за геоцентрическим расстоянием $\sim 10R_E$ находится плазменный слой, по которому протекает электрический ток, разделяющий хвост на северную долю, где магнитное поле направлено к Земле, и южную долю, в которой поле направлено от Земли (рис. 6).

Прежде чем продолжать обсуждение, полезно рассмотреть величины некоторых параметров магнитного хвоста и магнито-

сферы. Они представлены в табл. 1 и взяты из нескольких литературных источников. Источники указаны в таблице, так что интересующиеся читатели могут найти подробности вычислений. На долю геомагнитного хвоста приходится лишь ничтожная часть (0,007) энергии магнитного поля Земли. Энергия, необходимая для поддержания существования хвоста, составляет около 20 % приходящей энергии солнечного ветра. Энергия,

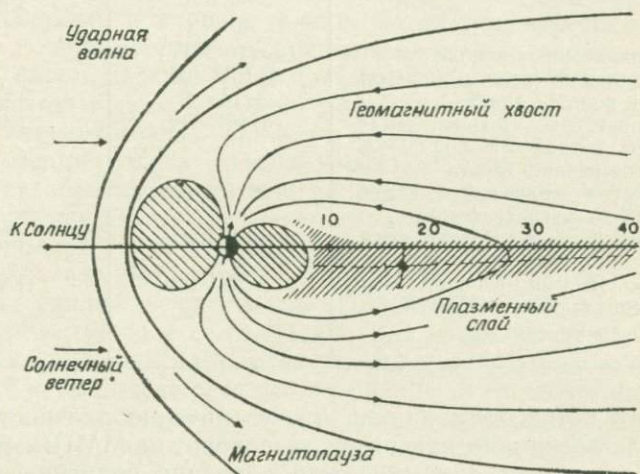


Рис. 6. Схематическое изображение конфигурации магнитосферы в плоскости полуденно-полуночного меридиана солнечно-магнитосферной системы координат. Показаны ударная волна, магнитопауза, пояса захваченной радиации и плазменный слой [34].

диссипирующаяся во время суббурь у Земли и во внутренних областях магнитосферы, составляет только 10 % энергии, необходимой для поддержания хвоста. Последняя цифра наводит на мысль, что прямое измерение энергии, накопленной в хвосте, очень трудно выполнить, поскольку это накопление в любой момент вызывает лишь малые изменения полной энергии, содержащейся в хвосте; кроме того, и напряженность поля в хвосте, и размеры хвоста могут изменяться так, чтобы прийти в соответствие с изменившимся содержанием энергии, так что задача определить при помощи одного или даже нескольких спутников, как изменяется содержание энергии в хвосте, представляется почти безнадежной.

Каан и др. [23] использовали измерения динамического давления солнечного ветра и магнитного поля с одновременными измерениями магнитного поля в доле хвоста для поисков изменений плотности энергии хвоста, связанных с параметрами

Таблица 1

Примерные величины некоторых параметров магнитного хвоста и магнитосферы

Параметр	Величина	Источник
Длина	$500 R_E$	[31]
Диаметр	$40 R_E$	
Средняя напряженность поля	$10\gamma (10^{-4} \text{ Гс})$	
Энергосодержание (поле и плазма)	$7 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$	
Полный ток поперек хвоста	$5 \cdot 10^7 \text{ А}$	[31]
Энергия, постоянно затрачиваемая солнечным ветром на поддержание существования хвоста	$3 \cdot 10^{12} \text{ Вт}$	[31]
Поток энергии солнечного ветра, падающий на магнитосферу	$1,6 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$	[31]
Полная энергия геомагнитного поля вне твердой Земли	10^{18} Дж	[32]
Диссипация энергии в ионосфере и внутренних областях магнитосферы во время суббури	$3 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$	[33]

солнечного ветра. Они нашли, что увеличение плотности энергии в доле возникало как вслед за поворотом ММП к югу, так и вслед за ростом динамического давления солнечного ветра, а также, что плотность энергии в доле уменьшалась во время фазы расширения суббури. В последующем наступлении на проблему накопления (и высвобождения) энергии Каан и др. [24] использовали метод анализа наложенных эпох, с тем чтобы исследовать среднюю зависимость плотности магнитной энергии в доле хвоста от северно-южной компоненты ММП и связь с фазой расширения суббури. Они обнаружили, что повышенная магнитная энергия в доле ассоциируется с началом фазы расширения. Одновременно с этим плотность энергии в доле хвоста начинает быстро падать.

Маезава [25] наблюдал пересечения спутником границы хвоста магнитосферы на расстояниях примерно от 30 до $70R_E$ от Земли, совпадающие с возникновением суббурь. Он обнаружил, что радиус геомагнитного хвоста возрастает за 1—2 ч перед началом фазы расширения. Вскоре после этого радиус хвоста начинает быстро уменьшаться. Он нашел, что среднее приращение ΔR радиуса хвоста удовлетворяет неравенству $0,5R_E < \Delta R < 4R_E$, вероятная величина приращения составляет от 1 до $2R_E$.

Эти локальные наблюдения изменений хвоста укрепляют концепцию накопления и высвобождения там магнитной энер-

гии. Кроме этого, существует другое направление исследований, по крайней мере столь же информативное — это изучение вариаций диаметра полярной шапки, связанных с суббуриями. Полярные сияния (и соответствующая им диссипация энергии за счет высыпавшихся частиц и ионосферных токов) происходят в основном в полосах, окружающих северный и южный магнитные полюса и смещенных от них на расстояние примерно от 15 до 30° по магнитной широте. Эти зоны называются овалами полярных сияний. Считается, что овалы соединены на ночной стороне магнитными силовыми линиями с плазменным слоем хвоста, а на дневной стороне — с пограничным слоем, который, как отмечено ранее, покрывает подсолнечную сторону магнитосферы. Области с относительно малой активностью соединяются с долями хвоста. В случае, когда магнитное поле добавляется к полю долей хвоста, диаметр полярных шапок увеличивается; изменения этого диаметра являются, таким образом, мерой увеличения и потерь магнитной энергии хвоста. Акасофу [26], исследуя диаметр овала по фотографиям полярных сияний со спутников «DSMP» ВВС США, попытался дать количественные соотношения для этой связи. Он обнаружил, что появление направленного к югу ММП на самом деле приводит к увеличению диаметра овалов, в то время как ММП, направленное к северу, приводит к его уменьшению. В случаях, когда размеры овала велики, на его ночной стороне возникают большие области авроральной активности (т. е. суббури). Иными словами, когда в хвосте запасено много энергии, он приобретает большую способность диссипировать ее в авроральных процессах. В случае, когда запасено мало энергии, мала и диссипация. Тем не менее, даже когда авроральная активность достигает очень низкого значения, область овала сохраняет конечный размер ($\sim 5 \cdot 10^6$ км²). Это приводит к мысли, что резервуар энергии в магнитном хвосте имеет «основной уровень», ниже которого энергия не опускается никогда. Очень может быть, что этот минимальный уровень запасенной энергии — как раз тот, который поддерживается за счет взаимодействия между солнечным ветром и пограничным слоем в случае, когда связь путем магнитного пересоединения минимальна и динамическое давление солнечного ветра мало.

3.2. ВЫСВОБОЖДЕНИЕ ЭНЕРГИИ ИЗ МАГНИТНОГО ХВОСТА

Из табл. 1 видно, что диссипация энергии в магнитном хвосте должна происходить непрерывно со скоростью $\sim 3 \times 10^{12}$ Вт. Это та энергия, которая тратится только на поддержание существования хвоста, аналогично тому, как происходит выделение тепла в обмотках электромагнита при протекании

тока, необходимого для поддержания поля. Неизвестны какие-либо детали того, где или как диссипирует основная часть этой энергии. Однако часть ее ($\sim 10\%$ по табл. 1) теряется во время суббури у Земли и во внутренних областях магнитосферы.

Магнитосферная суббури на Земле характеризуется внезапным увеличением яркости полярных сияний в полуденном секторе аврорального овала и последующим развитием области

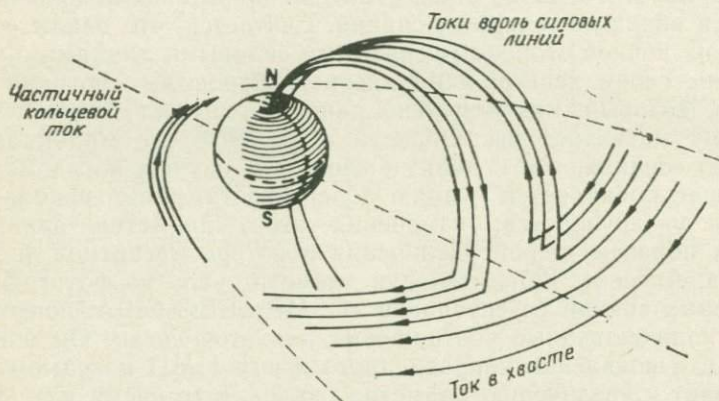


Рис. 7. Токи в магнитосфере во время магнитосферной суббури. Ток в магнитном хвосте разорван и образовался новый контур магнитосферных токов — вниз по силовым линиям в ионосферу и обратно в хвост. Кольцевой ток усилился [29].

повышенной яркости сияний, которая распространяется внутрь полярной шапки по направлению к полюсу, а также на восток и на запад вдоль овала. Вблизи ярких сияний в ионосфере протекают интенсивные токи в западном направлении (западный электроджет). Они вызывают под собой возмущения магнитного поля у поверхности Земли, которые характеризуются, в частности, понижениями горизонтальной составляющей основного поля, называемыми «отрицательными бухтами». Теория утверждает, что суббури возникает в том случае, когда часть тока, текущего поперек хвоста (в западном направлении) и поддерживающего существование хвоста, каким-то образом разрывается и, отклонившись от первоначального пути, течет вниз вдоль силовых линий, а затем — в западном направлении, по ионосфере. Эта концепция показана на рис. 7.

Расщепление поперечного тока в хвосте приводит к образованию у магнитного поля нейтральной линии (или x -линии). Пересоединение силовых линий магнитного поля на x -линии позволяет частям силовых линий, ближним к Земле, быстро сокращаться в сторону Земли, что приводит к конвекции внутрь

магнитосферы плазмы, первоначально находившейся в плазменном слое. За счет магнитного сжатия плазма нагревается до энергии от нескольких кэВ до нескольких десятков кэВ и смещается внутрь магнитосферы вплоть до расстояний $\sim 5 \div 6R_E$, где она затем дрейфует вокруг Земли, образуя кольцевой ток. Кроме того, часть плазмы распространяется вниз по силовым линиям и высыпается в ионосферу, где порождает авроральное свечение. Во время некоторых суббурь в плазменном слое наблюдаются протоны и электроны с энергиями в сотни кэВ, иногда до 1 МэВ. Считают, что они генерируются сильными электрическими полями, вызванными изменениями магнитного поля вблизи x -линии при разрыве тока поперек хвоста.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВНЕШНЕЙ МАГНИТОСФЕРЫ С ИОНОСФЕРОЙ

Мы видели, что солнечный ветер при своем взаимодействии с магнитосферой замедляется образующимися токами поляризации, которые замыкаются токами деполяризации, текущими вдоль силовых линий и передающими ионосфере потерянный ветром импульс. Эти токи втекают из области взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы в дневную часть овала полярных сияний на границе полярной шапки, где силовые линии, идущие с дневной стороны магнитосферы, достигают Земли. Подобно этому возмущения в магнитном хвосте, связанные с изменениями в нем энергии (т. е. суббурями), передаются продольными по отношению к полю токами на ночную сторону аврорального овала. Таким образом, для того, чтобы хорошо понимать природу ионосферно-магнитосферного взаимодействия, необходимо прежде всего тщательно разобраться в генерации продольного тока, его распределении, вариациях и взаимодействии с ионосферной плазмой.

Продольные токи могут быть измерены только на больших высотах (внутри ионосферы и над ней) на ракетах и спутниках, поскольку на уровне Земли их «магнитные подписи» неразборчивы и не могут быть надежно отождествлены. Спутниковые и ракетные измерения токов основаны на измерениях вызываемых ими магнитных возмущений, поперечных по отношению к основному полю. Было найдено, что токи распределены по слоям, которые следуют приблизительно кривой аврорального овала. Их распределение показано на рис. 8 для спокойных и для более возмущенных периодов. Ближайшее к полюсу кольцо известно как 1-я система токов, а кольцо с экваториальной стороны — как 2-я система. Отметим, что 1-я система токов втекает в ионосферу между 00 и 12 UT и вытекает из ионосферы между 12 и 24 UT. 2-я система токов имеет обрат-

ные направления по отношению к 1-й. Две такие же токовые системы существуют и над южным полушарием, у них то же самое направление тока относительно ионосферы. В области, где проводятся измерения, в нескольких сотнях километров над землей, плотности токов лежат в пределах от $\sim 0,3$ до

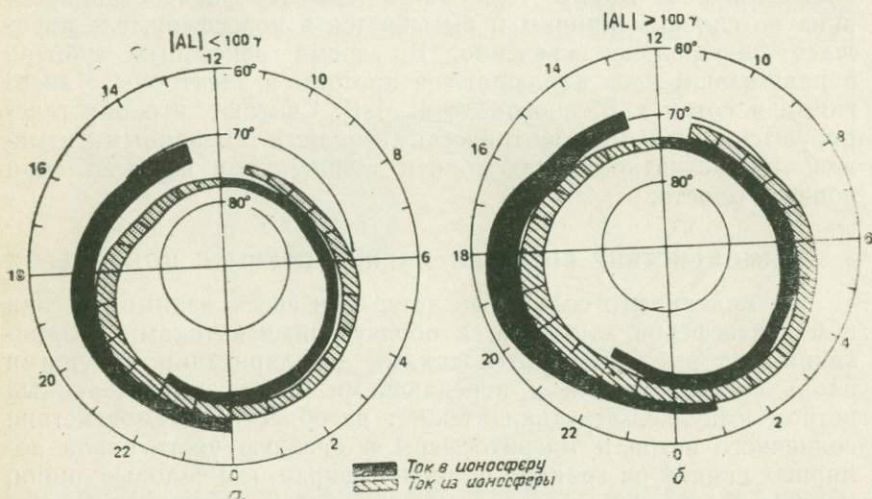


Рис. 8. Сводка результатов о распределении и направлении крупномасштабных продольных токов, определенных: а — по данным 439 орбит спутника «Триад» в условиях слабой магнитной возмущенности ($|AL| < 100\gamma$), б — по данным 366 орбит спутника «Триад» в периоды повышенной активности $|AL| \geq 100\gamma$ [27].

$\sim 2,5 \text{ мА/м}^2$ [27]. На рис. 8 показана и другая важная особенность продольных токов, а именно что картина их распределения не изменяется сколько-нибудь заметно с ростом геомагнитной активности, она просто сдвигается на несколько более низкие широты (что находит свое отражение в увеличении диаметра аврорального овала и, как это следует из прежних рассуждений, в увеличении энергии, запасенной в магнитном хвосте). В пределах ошибки эксперимента полный ток, втекающий в ионосферу, равен вытекающему из нее току. Значения тока составляют $\sim 2,5 \cdot 10^6 \text{ А}$ для магнитоспокойных периодов и $\sim 5 \cdot 10^6 \text{ А}$ для в среднем магнитовозмущенных периодов.

Токи 1-й системы окаймляют полярную шапку. Таким образом, можно думать, что эти токи на дневной стороне соединены с наиболее удаленными подсолнечными участками магнитосферы. Разумно предположить, что эти токи представляют собой токи деполяризации, текущие от границы магнитосферы, тем более обнаружено, что плазма со свойствами, аналогичными

свойствам в пограничном слое (т. е. с малой энергией), высыпается в атмосферу вдоль овала 1-й системы токов [28, 29]. Истмэн и др. [4] показали, что направление и другие особенности токов совместимы с такой интерпретацией. Считают, что на ночной стороне полярной шапки токи 1-й системы текут вдоль силовых линий, лежащих на верхней и нижней поверхностях плазменного слоя в магнитном хвосте. Для этих токов ночной стороны 1-й токовой системы неизвестна движущая сила, однако нет сомнения, что она включает в себя силы, действующие в плазменном слое между плазмой и магнитным полем.

1-я токовая система может также быть причиной возникновения слоев пространственного заряда, которые являются источником вышеупомянутого восточно-западного электрического поля в полярных шапках, вызывающего там конвекцию (т. е. дрейф $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) плазмы.

На высотах более 150 км протеканию токов, перпендикулярных \mathbf{B} , препятствует малость частоты столкновений ионов или электронов с нейтральными частицами; здесь приложение электрического поля, перпендикулярного \mathbf{B} , просто вызывает равный $(\mathbf{E} \times \mathbf{B})/B^2$ дрейф ионов и электронов, не приводящий к возникновению тока. Однако ниже 150 км частота ион-нейтральных столкновений становится заметной и продольные токи начинают отклоняться так, чтобы течь по ионосфере в горизонтальном направлении. В этой области электрическое поле, перпендикулярное \mathbf{B} , вызывает дрейфовое движение ионов в двух направлениях — в направлении $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ (холловский дрейф) и вследствие соударений ионов с нейтралями — в направлении \mathbf{E} (педерсеновский дрейф). Скорость столкновений электронов с нейтралями остается при этом несущественной выше 80 км. Таким образом, перпендикулярные электрические поля вызывают у электронов только холловский дрейф в области от 80 до 150 км, где у ионов значителен педерсеновский дрейф. В результате в этой области образуется смесь холловских и педерсеновских токов, изменяющаяся с высотой. Поскольку холловские токи перпендикулярны \mathbf{E} , с ними не связана диссипация энергии или падение напряжения. Однако падение напряжения или диссипация энергии обязательно возникает из-за педерсеновских токов. Итак, токи, текущие из внешней магнитосферы, отклоняются и протекают через авроральную ионосферу горизонтально, как педерсеновские токи, формируя в ней картину электрических полей. За счет силы $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ они переносят импульс от плазмы внешней магнитосферы к ионосферной плазме и далее к нейтральной атмосфере на ионосферных высотах. Детальное описание электрических полей и токов в ионосфере, а также многочисленных последствий этих

явлений выходит за рамки этого обзора, однако его можно найти, например, у Бэнкса [30].

5. ВЫВОДЫ

Импульс солнечного ветра переносится во внешние области магнитосферы за счет непосредственного проникновения плазмы солнечного ветра в замкнутые силовые трубки на поверхности магнитосферы, а также за счет пересоединения ММП с земным магнитным полем. В обоих механизмах электрическая поляризация плазмы солнечного ветра, возникающая при ее движении через область взаимодействия, образует источник электрических токов, которые вызывают передачу утраченного плазмой импульса частично ионосфере и частично геомагнитному хвосту. В некотором отношении взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой очень напоминает действие электрического МГД-генератора. На эффективность передачи импульса магнитосфере влияют различные характеристики солнечного ветра, однако наиболее важной в этом отношении представляется направление (и в меньшей степени — величина) ММП. Это было убедительно продемонстрировано различными способами и, по-видимому, подтверждает существование пересоединения ММП с земным магнитным полем. Однако до сих пор не было обнаружено прямых свидетельств пересоединения на подсолнечной стороне магнитосферы, где этот процесс предположительно должен происходить.

Токи из области взаимодействия текут вдоль магнитных силовых линий в полярную ионосферу. Эти «продольные токи» порождают на высоте в несколько тысяч километров продольные электрические поля, ускоряющие частицы ионосферной плазмы до энергии в несколько кэВ. Растекаясь горизонтально в нижней атмосфере, токи создают силу $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, которая передает импульс солнечного ветра ионосферной плазме и затем — нейтральному газу.

Накопление энергии солнечного ветра в геомагнитном хвосте и ее высвобождение во время суббурь может быть обнаружено как прямыми наблюдениями в окрестности хвоста, так и наблюдениями за изменениями овала полярных сияний. Часть энергии, теряемой хвостом в течение суббури, передается Земле и внутренним областям магнитосферы, а часть выбрасывается из хвоста вдоль по потоку солнечного ветра в виде магнитного пузуря или «плазмоида».

Эта работа была выполнена при поддержке Министерства энергетики США.

Литература

1. Baker D. A. and Hammel J. E. *Phys. of Fluids*, 8, 713, 1965.
2. Hones E. W., Jr., Asbridge J. R., Bame S. J., Montgomery M. D., Singer S., Akasofu S. I. *J. Geophys. Res.*, 77, 5503, 1972.
3. Rosenbauer H., Grunwaldt H., Montgomery M. D., Paschmann G., Sckopke N. J. *Geophys. Res.* 80, 2723, 1975.
4. Eastman T. E., Hones E. W., Jr., Bame S. J., Asbridge J. R. *Geophys. Res. Lett.*, 3, 685, 1976.
5. Palmer I. D., Hones E. W., Jr. *J. Geophys. Res.*, 83, 2584, 1978.
6. Svalgaard L. In: *Coronal Holes and High Speed Wind Streams*, ed. by J. B. Zirker, Colorado Associated University Press, Boulder, 1977, p. 371.
7. Fairfield D. H. and Cahill L. J., Jr. *J. Geophys. Res.*, 71, 155, 1966.
8. Wilcox J. M., Ness E. F. *J. Geophys. Res.*, 70, 5793, 1965.
9. Russell C. T., McPherron R. L. *J. Geophys. Res.*, 78, 92, 1973.
10. Paulikas G. A., Blake J. B. *Geophys. Res. Lett.*, 3, 277, 1976.
11. Sheeley N. R., Jr., Asbridge J. R., Bame S. J., Harvey J. W. *Solar Physics*, 52, 485, 1977.
12. Mozer F. S., Conzalez W. D., Bogott F., Kelley M. C., Schutz S. J. *Geophys. Res.*, 79, 56, 1974.
13. Svalgaard L. *Geophys. Pap. R-6*, 11 pp., Dan. Meteorol. Inst., Copenhagen, August, 1968.
14. Svalgaard L. *J. Geophys. Res.*, 78, 2064, 1973.
15. Svalgaard L. *J. Geophys. Res.*, 77, 4027, 1972.
16. Friis-Christensen E., Lassen K., Wilhelm J., Wilcox J. M., Gonzalez W., Colburn D. S. *J. Geophys. Res.*, 77, 3371, 1972.
17. Heppner J. P. *J. Geophys. Res.*, 77, 4877, 1972.
18. Rosenberg R. L., Coleman P. J., Jr. *J. Geophys. Res.*, 74, 5611, 1969.
19. Wilcox J. M., Scherrer P. H. *J. Geophys. Res.*, 77, 5385, 1972.
20. Smith E. J., Tsurutani B. T., Rosenberg R. L. *J. Geophys. Res.*, 83, 717, 1978.
21. Chernosky E. J. *J. Geophys. Res.*, 71, 965, 1966.
22. Ness N. F. *J. Geophys. Res.*, 70, 2989, 1965.
23. Caan M. N., McPherron R. L., Russell C. T. *J. Geophys. Res.*, 78, 8087, 1973.
24. Caan M. N., McPherron R. L., Russell C. T. *J. Geophys. Res.*, 80, 191, 1975.
25. Maezawa K. *J. Geophys. Res.*, 80, 3543, 1975.
26. Akasofu S. I. *Planet. Space Sci.*, 23, 1349, 1975.
27. Iijima T., Potemra T. A. *J. Geophys. Res.*, 83, 599, 1978.
28. McDiamid I. B., Burrows J. R., Budzinski E. E. *J. Geophys. Res.*, 80, 73, 1975.
29. McDiamid I. B., Burrows J. R., Budzinski E. E. *J. Geophys. Res.*, 81, 221, 1976.
30. Banks P. M. In: *Solar System Plasma Physics: A Twentieth Anniversary Overview*, ed. by C. F. Kennel, L. J. Lanzerotti, E. N. Parker, North Holland Publ. Co., 1977.
31. Svalgaard L. In: *Possible Relationships Between Solar Activity and Meteorological Phenomena*, NASA SP-366, ed. by W. R. Bandeen and S. P. Maran, NASA Scientific and Technical Information Office, Washington, D. C., 1975.
32. Willis D. M. *J. Atmos. Terr. Phys.* 38, 685, 1976.
33. Akasofu S. I. *Polar and Magnetospheric Substorms*, Springer-Verlag, New York, 1968, p. 223. [Имеется перевод: Акасофу С. И. Полярные и магнитосферные суббури.— М.: Мир, 1971.]
34. Bame S. J., Asbridge J. R., Felthausen H. E., Hones E. W., Strong I. B. *J. Geophys. Res.*, 72, 113, 1967.

ИНДЕКС ПОВТОРЯЕМОСТИ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Г. Х. Сарджент III

Построен простой индекс повторяемости геомагнитной активности. Значения этого индекса были рассчитаны для 110-летнего периода с использованием *aa*-индекса Майо. Характер изменения этого индекса достаточно четко отражает 11-летний цикл солнечных пятен, при этом сильный отклик имеет место непосредственно перед каждым минимумом в этом цикле. Однако наиболее сильный отклик (в смысле длительности, а не амплитуд) имел место во время чередования циклов солнечных пятен каждые 22 года, что находится в согласии с временами появления обширных засух в США и других климатических явлений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Центр космических исследований ежедневно выпускает 3-суточные прогнозы 24-часового *A*-индекса геомагнитной активности по наблюдениям в Фредериксбурге, шт. Виргиния. Этот среднеширотный индекс дает хорошее представление об уровне геомагнитной возмущенности в пределах 48 штатов США.

Наиболее часто для предсказаний используются 24-суточные вращающиеся диаграммы, представляющие собой модифицированные схемы, развитые Бартельсом [1] для выявления периодичности или повторяемости магнитной активности, согласующейся с 27-суточным периодом солнечного вращения. В геомагнитных прогнозах используются диаграммы Бартельса, показанные на рис. 1. Они представляют собой просто плотно расположенные диаграммы, изображающие ежедневные значения 24-часового индекса. Новая серия начинается каждые 27 сут, при этом каждая серия продлевается на 8 сут для того, чтобы подчеркнуть непрерывность данных. Для предсказаний просматривают последние 4 или 5 вращений Солнца для того, чтобы определить, существует ли какой-нибудь повторяющийся

H. H. Sargent III. Space Environment Services Center, Boulder, CO 80303 USA.

признак всей картины. По этим картам могут быть установлены смещения по времени (с большей или меньшей частотой повторения), так же как и тренды в амплитудах возмущений. Эта

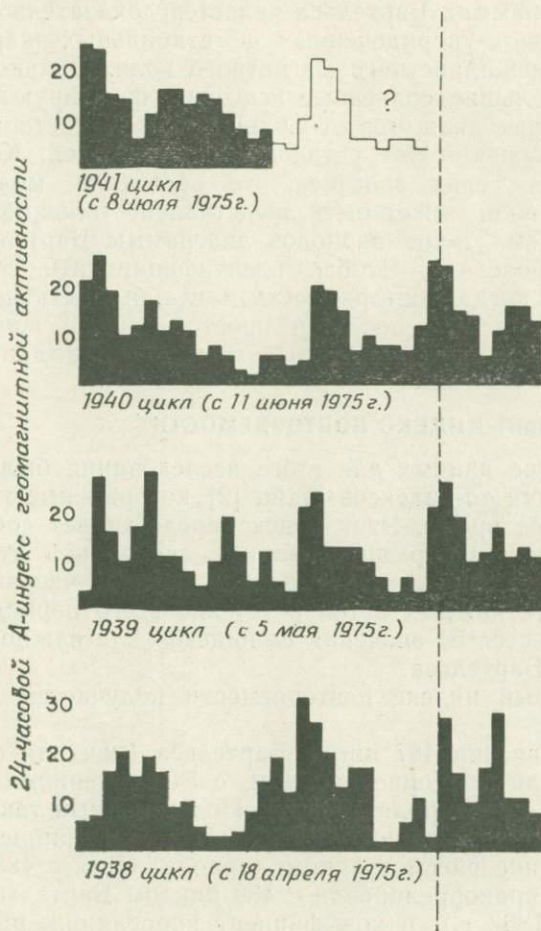


Рис. 1. Диаграммы Бартельса.

информация с учетом сезонных эффектов используется для предсказания как амплитуды, так и времени геомагнитных возмущений. Другие данные, т. е. данные о солнечных вспышках, карты корональных дыр, данные о межпланетных мерцаниях, измерения со спутников на солнечной орбите, используются, когда это возможно, в качестве дополнительной информации для прогнозирования, но каждый прогноз составляется, исходя из диаграмм Бартельса.

К сожалению, в течение каждого солнечного цикла существуют протяженные периоды, когда повторяемость или рекуррентность просто отсутствует! Картина повторяющихся признаков на диаграммах Бартельса является доказательством достаточно хорошо упорядоченных и стабильных характеристик структуры межпланетного магнитного поля. Однако, когда появляются большие солнечные вспышки, формируются ударные волны, которые движутся от Солнца в межпланетном пространстве и разрушают этот установленный порядок. Когда происходит целая серия вспышек, то состояние межпланетного магнитного поля может быть представлено только как хаотическое. Во время таких периодов диаграммы Бартельса, естественно, бесполезны. Чтобы идентифицировать те периоды в прошлом, когда повторяемость могла бы быть использована для прогнозов, был построен простой индекс повторяемости, основанный на опубликованных геомагнитных данных.

2. 27-СУТОЧНЫЙ ИНДЕКС ПОВТОРЯЕМОСТИ

В качестве данных для этого исследования были использованы значения *aa*-индексов Майо [2], которые имеются с 1868 г. по настоящее время. Этот индекс представляет собой высококачественную непрерывную запись глобальной геомагнитной активности. Он публикуется в виде двух 12-часовых средних значений для каждых суток в течение всего периода, и таким образом имеется 54 значения *aa*-индекса для каждого 27-суточного цикла Бартельса.

27-суточный индекс повторяемости получается следующим образом:

1) 54 значения 487 цикла Бартельса (начиная с 12 января 1868 г.) были прокоррелированы с 54 значениями 488 цикла Бартельса (с 8 февраля 1868 г.). Подсчитанный таким образом коэффициент корреляции, равный 0,289, был приписан к 8 февраля (середине рассмотренного периода). Далее 488 цикл Бартельса был прокоррелирован с 489 циклом Бартельса (начиная с 6 марта 1868 г.), и коэффициент корреляции, равный 0,384, был приписан к 6 марта и т. д. Таким образом, каждый цикл был коррелирован с рядом стоящим и коэффициент корреляции определялся каждые 27 сут.

2) Все коэффициенты были умножены на 100, чтобы представить их в целых числах.

3) Целочисленные значения коэффициентов были сглажены по 15 циклам Бартельса методом скользящего среднего. Эта сглаженная функция по длине почти эквивалентна модифицированной функции, полученной по 13 скользящим средним, которая традиционно используется для сглаживания средне-

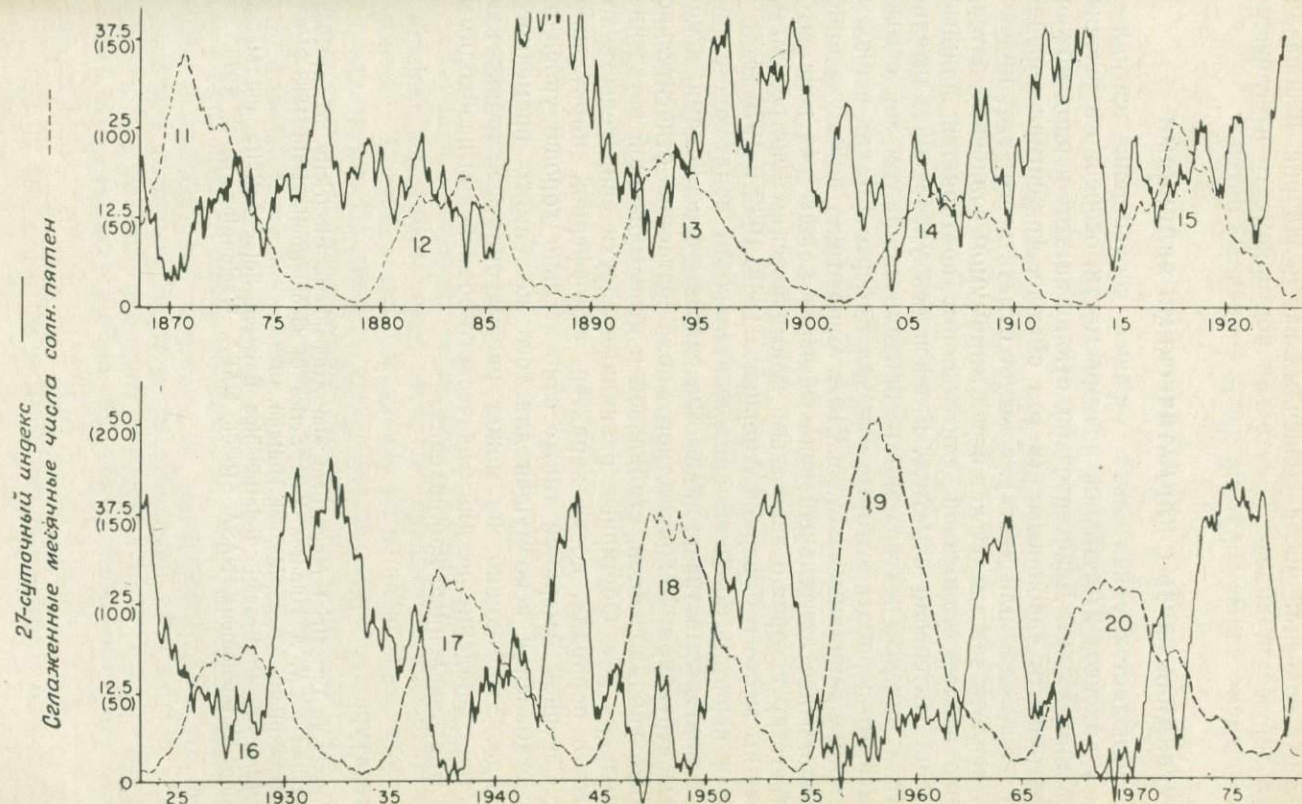


Рис. 2. 27-суточный индекс повторяемости и сглаженные месячные значения числа солнечных пятен с 1868 г. до настоящего времени.

месячных значений числа солнечных пятен. На рис. 2 показан результирующий индекс 27-суточной повторяемости и сглаженные среднемесячные значения числа солнечных пятен.

3. ОЧЕВИДНАЯ СВЯЗЬ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ

Наблюдается удивительно хорошее соотношение сигнал—шум у индексов 27-суточной повторяемости, особенно в течение последних 55 лет. Действительно, отклик за этот период можно назвать почти «двоичным» (в том смысле, что сигнал определяется как «да» или «нет»). Следует отметить, что этот индекс дает всплеск каждые 11 лет перед минимумом солнечных пятен, однако всплеск удвоенной длительности повторяется каждые 22 года. Интересно отметить, что всплеск удвоенной длительности в индексе повторяемости приходится на те же самые временные периоды, которые отмечал Робертс [3] как периоды обширных равнинных засух в США. Существует даже указание на еще более длительный всплеск через каждые 44 года, что соответствует хорошо известным климатическим экстремумам, имевшим место в Северной Америке в 1888, 1932 и 1976 гг.

Эти периоды большой продолжительности всплесков в индексе повторяемости, по-видимому, связаны с периодами, в которые структура межпланетного поля остается относительно хорошо упорядоченной, стабильной и невозмущенной в течение нескольких лет. Обширные равнинные засухи свидетельствуют также о периодах, когда характер атмосферной циркуляции над Северной Америкой также относительно хорошо упорядочен, стабилен и невозмущен для того же самого временного периода. Это, однако, не может рассматриваться только как простое совпадение, но для физического объяснения необходимы еще многочисленные наблюдения.

Литература

1. *Bartels J.* Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, **37**, 1, 1932.
2. *Mayaud P. N.* A Hundred Year Series of Geomagnetic Data 1868—1967, IAGA Bulletin No. 33, Meppel, Holland, 1973.
3. *Roberts W. O.* Possible Relationships Between Solar Activity and Meteorological Phenomena, NASA SR-366, NASA, Washington, D. C., 1975.

ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

К. И. Е. Шуурманс

Сильные солнечные вспышки производят изменения в атмосферной циркуляции (или изменения в распределении массы и температуры) в средних и высоких широтах менее чем через 12 ч после вспышки. Это ранний эффект, который продолжается примерно 1 сут; он более силен зимой и наиболее выражен в определенных географических районах. Максимум более поздних эффектов отмечался от 2 до 4 сут после вспышки. Вообще связь между этими эффектами известна очень мало. То же можно сказать об объяснении возможной роли солнечных вспышек в солнечно-климатических связях. Ранний эффект, наблюдаемый в тропосфере, возможно, объясняется сильной конвергенцией воздуха над большими областями в нижней стратосфере. Однако механизм, вызывающий эту конвергенцию, пока еще неизвестен. Ранний эффект через изменения бароклинной устойчивости в среднеширотной тропосфере мог бы привести к некоторым более поздним эффектам.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о влиянии солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы еще остается предметом противоречивых мнений. В самой такой постановке он не очень плодотворен или продуктивен. Прогресс в этой области несколько сдерживался отсутствием количественной теории, но и недостаточные знания характеристик эффектов являются также серьезным препятствием. В связи с этим важно сконцентрировать внимание на одном из предлагаемых эффектов и дальнейшем анализе его природы. Предмет обсуждения — эффект солнечных вспышек в атмосферной циркуляции. Информация в этой работе основана главным образом на сравнении результатов, описанных в монографии, изданной автором в 1969 г. [9], с результатами последующих публикаций по данному предмету. Эффект

C. J. E. Schuurmans. Royal Netherlands Meteorological Institute, The Netherlands.

описан в ч. 2, а в ч. 3 и 4 обсуждены подтверждающие или неподтверждающие его данные. В ч. 5 и 6 трактуются последствия эффектов. Наконец, в ч. 7 изложены некоторые теоретические идеи, касающиеся причины и развития воздействия вспышки.

2. ЭФФЕКТ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

В 1969 г. были опубликованы результаты обширных исследований, относящихся к изменениям в земной нижней атмосфере, связанным с солнечной вспышкой [9, 10]. Изучение было основано на выборке из 81 сильной солнечной вспышки, которые наблюдались в течение периода июль 1957 г.—декабрь 1959 г. Наиболее часто анализируемым атмосферным параметром была высота поверхности 500 мбар. Статистическая часть исследования концентрировалась на изменении высоты поверхности 500 мбар за 24 ч для различных временных сдвигов относительно момента вспышки. Исследование было глобальным по охвату, за исключением экваториального пояса. Оказалось, что наибольшие изменения средней высоты поверхности 500 мбар наблюдаются очень скоро после начала вспышки, в среднем в течение 6 ч, в то время как продолжительность воздействия заключена в пределах первых 24 ч.

Карта максимального эффекта воспроизведена на рис. 1. Она показывает изменение средней высоты поверхности 500 мбар между первым радиозондовым наблюдением после вспышки и наблюдением на 24 ч раньше, деленное на $\sigma N^{-1/2}$, где $N=81$ и σ — стандартное отклонение изменений высоты за 24 ч. Первое радиозондовое наблюдение после вспышки варьировало во времени от менее чем 1 ч до почти 12 ч. В среднем карта относится ко времени через приблизительно 6 ч после вспышки. Карта показывает довольно хаотическую картину, состоящую из ячеек подъема и падения средней высоты. Эта картина доминирует в средних широтах, в то время как в полярных районах преобладают отрицательные изменения. В низких широтах изменения средней высоты очень малы. Они достигают здесь значения двух стандартных отклонений ($\sigma N^{-1/2}$), хотя этот параметр сам очень мал в зоне низких широт. В средних и высоких широтах число точек сетки со значением t ($t = \Delta \bar{H} / \sigma N^{-1/2}$), достигающим определенных пределов, больше, чем можно ожидать при случайном процессе. Это было проверено путем сравнения с рядами случайных чисел (R) и последовательного расширения сети, чтобы исключить пространственную корреляцию между значениями в точках

сетки. Соответствующие числа по этим тестам приведены в табл. 1 и 2.

После этих тестов было сделано заключение, что картина, показанная на рис. 1, характеризует реальный эффект, хорошо

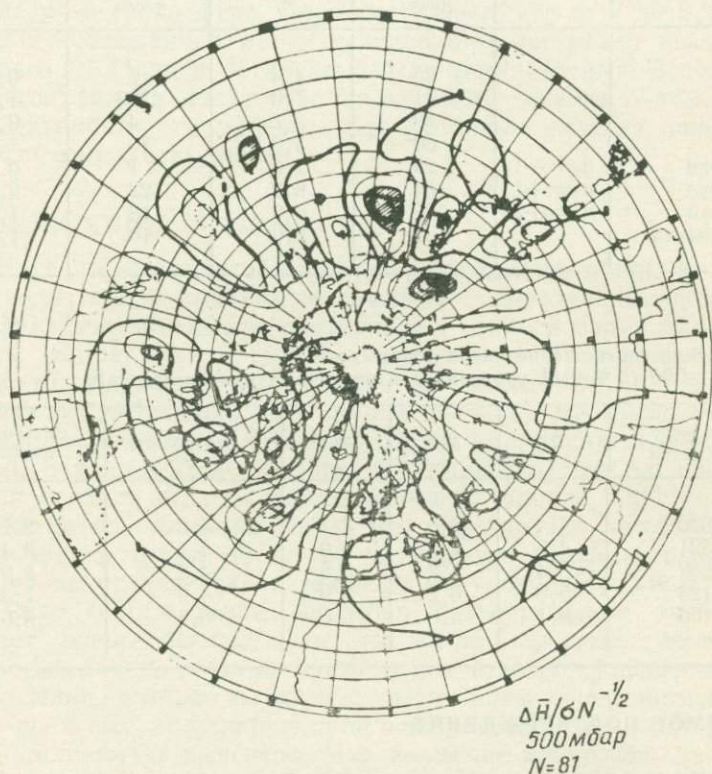


Рис. 1. Средние разности высоты поверхности 500 мбар между первым аэрологическим наблюдением после вспышки и наблюдением на 24 ч раньше, деленные на стандартную ошибку среднего.

выделяющийся над синоптическим «шумом» на этой высоте.

Данные для южной полушария были проанализированы так же, одно отличие заключалось в том, что число вспышечных ключевых дней было в этом случае только 56. Результирующая картина выглядит очень похожей на показанную на рис. 1: перемежающаяся картина в средних широтах с преобладанием ячеек подъема высоты и падением высоты в полярных районах.

Таблица 1

Тесты

Ряд	Период	Число, где $ t > 1,96$ (5 %-ный уровень)		Число, где $ t > 2,58$ (1 %-ный уровень)	
		число	%	число	%
R I		45	4,4	7	0,7
R II		71	7,0	10	1,0
R III		38	3,7	4	0,4
R IV		60	5,9	10	1,0
Вспышки	$n = -1$	26	2,6	1	0,1
Вспышки	$n = +1$	84	8,2	23	2,3
Вспышки	$n = +2$	82	8,0	18	1,8
Вероятность		51	5,0	10	1,0

Таблица 2

Процентное соотношение числа точек сетки, где $|t| > 1,96$ (5 %-ный уровень) для различных плотностей сети

N_t = число точек сетки	R I	R II	R III	R I + R II + R III	Солнечные вспышки
1020	4,4	7,0	3,7	5,0	8,2
521	4,6	7,5	4,0	5,4	8,4
262	3,4	7,2	3,8	4,8	8,0
128	5,6	5,2	3,9	4,9	7,3
66	6,1	5,0	5,6	5,6	8,6

3. ПРЯМОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

3.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Подобные описанным выше и непосредственно сравнимые исследования были пока ограничены европейским регионом. Для этой области были уже опубликованы два анализа по независимым случаям вспышек: один сделан Дьюэллами в 1948 г. [1], и второй — Валничекком в 1953 г. [14]. В обоих исследованиях было показано, что в качестве раннего эффекта солнечных вспышек существует подъем средней высоты, полностью сопоставимый с ячейкой подъема высоты над Европой в наших ранних исследованиях. Однако в этих исследованиях не было сделано оценки статистической значимости. Недавно, однако, Зерефос [16] выполнил независимую статистическую оценку влияния солнечных вспышек на высоты уровней давле-

ния в атмосфере. Его анализ был основан на примерах 33 вспышек для периода от 1956 до 1969 г. и относился ко всей Северной Америке и части окружающих областей.

Зерефос полностью подтвердил перемежающуюся картину подъема и опускания средней высоты уровней постоянного давления в тропосфере. Он также нашел, что от 7 до 8 % станций, использованных в его исследовании, достигают значения t , равного 2. Полное согласие между результатами Зерефоса и нашего анализа достаточно подкрепляет мнение о том, чтобы рассматривать эти эффекты как реальные явления, связанные с солнечными вспышками.

3.2. КОНКРЕТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Настало время, чтобы последовать дальше общих аспектов. Согласуются ли сравнимые анализы с определенными свойствами эффектов? Четыре специальных вопроса будут обсуждены здесь. Во-первых, время наступления и продолжительность эффекта. Первое аэрологическое наблюдение после вспышки показало наибольший эффект (см. разд. 2), что было подтверждено исследованием Зерефоса. Во-вторых, распределение с высотой. В нашем исследовании мы нашли, что наибольшие изменения средней высоты наблюдаются на уровне 300 мбар, но, принимая во внимание факт, что стандартное отклонение на этом уровне также достигает максимума, значимость эффекта сильно не отличается от такового на уровне 500 мбар.

Ниже 500 и выше 300 мбар статистическая значимость падает очень быстро, как это было показано Зерефосом. В-третьих, очень важным пунктом является географическое распределение, которое в связи с отсутствием сопоставимых данных по всему полушарию или глобальных данных не может быть полностью выяснено. Что касается широтного распределения, то мы можем сравнить рис. 2 и 3, которые указывают на два уже упомянутых эффекта; преобладание подъема высоты на (низких) средних широтах и падение высоты от субполярных до полярных широт. Наибольшее различие между двумя результатами состоит в значении широты, где зональное среднее значение изменяется от положительного к отрицательному: 65° с. ш. в нашем случае и 52° с. ш. в исследовании Зерефоса. Однако следует принять во внимание, что кривые не могут быть точно сравнимы в связи с тем, что исследования Зерефоса касаются только американского сектора северного полушария.

Концентрируя внимание на средних широтах, мы можем поставить вопрос о долготном положении ячеек подъема и опускания высоты. Есть ли преобладающие долготы, на которых они фиксируются? Сравнение наших результатов с более

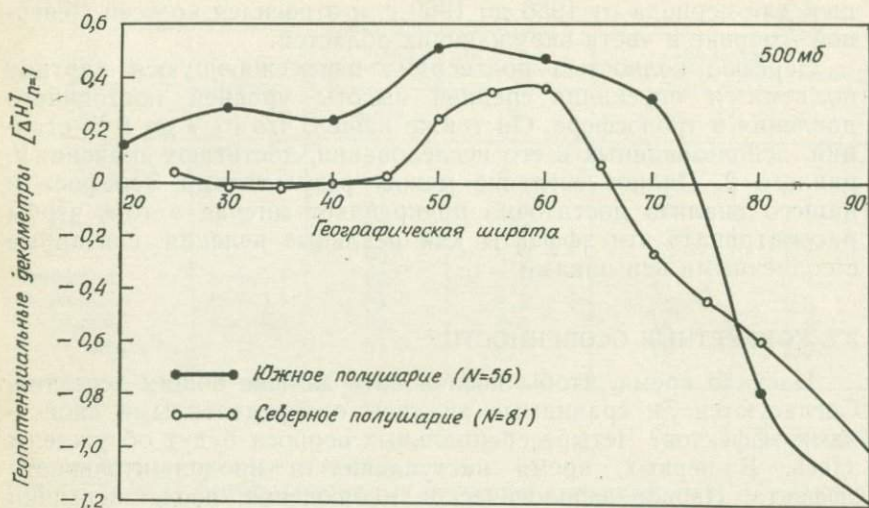


Рис. 2. Средние зональные изменения высоты поверхности 500 мбар между первым аэрологическим наблюдением после вспышки и наблюдением на 24 ч раньше (в геопотенциальных декаметрах).

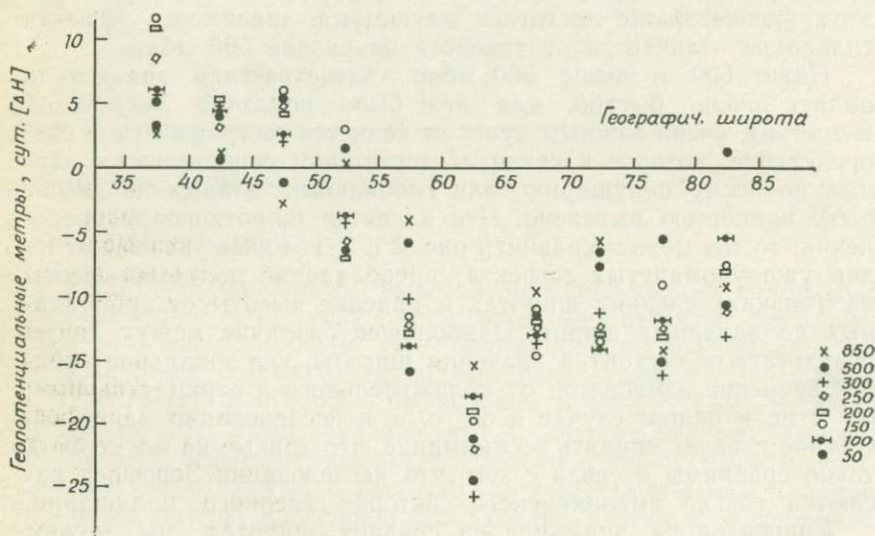


Рис. 3. То же самое, что на рис. 2, но для независимых случаев 33 вспышек и для всех указанных уровней давления [16].

ранними (Дьюэлла [1] и Валничека [14]) могли бы указать, что Западная Европа является районом, где преобладает подъем высоты уровня. Хотя для сравнения с другими результатами могло быть сделано очень мало, рис. 4 показывает вариации с долготой экстремумов в изменении средней высоты

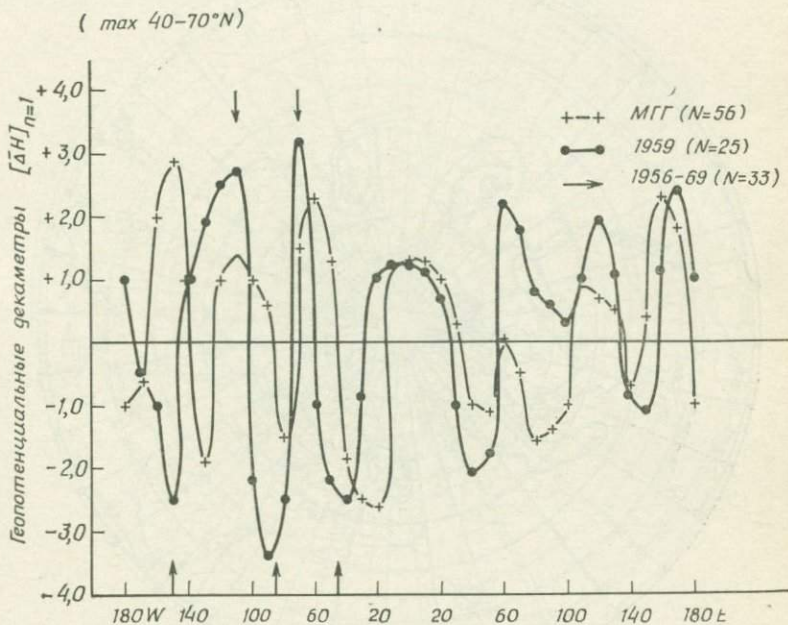


Рис. 4. Экстремумы изменений средней высоты поверхности 500 мбар после солнечных вспышек в широтном поясе от 40 до 70° с. ш. как функция географической долготы. Случаи вспышек для МГГ и 1959 г. проанализированы Шуурмансом, а для 1956–1969 гг.—Зерефосом [16].

в широтном поясе 40—70° с. ш. Сравнение основано на независимых примерах вспышек для периода МГГ (июль 1957 г.—декабрь 1958 г.), для 1959 г. и для примеров, использованных Зерефосом [16]. Поскольку Зерефос не опубликовал сами значения изменений средней высоты, а только значения, деленные на $\sigma N^{-1/2}$, по его карте можно отметить только долготу экстремумов (стрелки). Из рассмотрения кривых и стрелок трудно заключить, существует ли долготная вариация эффекта солнечной вспышки. Для Европы, Атлантики и восточной части Северной Америки данные подтверждают друг друга. Ясно, что следует продолжить исследование этого эффекта, пока не будет

получено более определенного суждения. Наконец, наблюдаются сезонные вариации эффекта. В нашем исследовании были проанализированы четыре сезона отдельно, и значимые эффекты

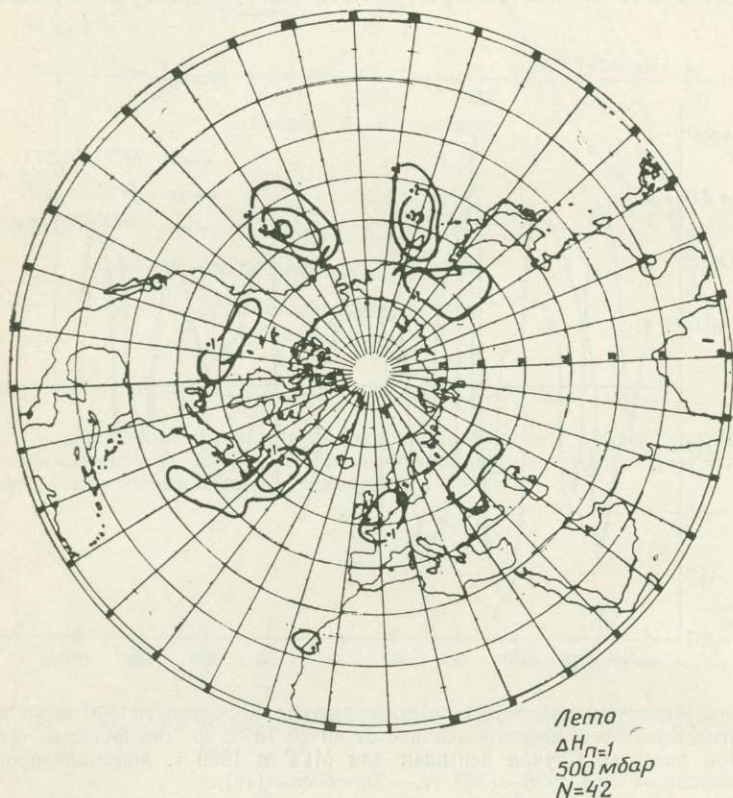


Рис. 5. Ячейки средней величины подъема высоты поверхности 500 мбар после солнечной вспышки, превосходящей 1 геопотенциальный декаметр, для теплой половины года.

были найдены в каждом из них. Однако зимний сезон показал самую сильную реакцию. Работа Зерфоса, кажется, подтверждает это, хотя он подразделил случаи вспышек только на две группы: холодный и теплый сезоны. Если мы сделаем то же самое, то преобладание холодного сезона над теплым подтверждается, но не подавляющим образом, как мы ожидали. Это заключение может быть проверено сравнением рис. 5 и 6. Интересно, что сравнение этих рисунков дополняет прежнее

предположение, показывая, что долготная вариация эффекта существует, вероятно, не только от года к году, но также в течение года.

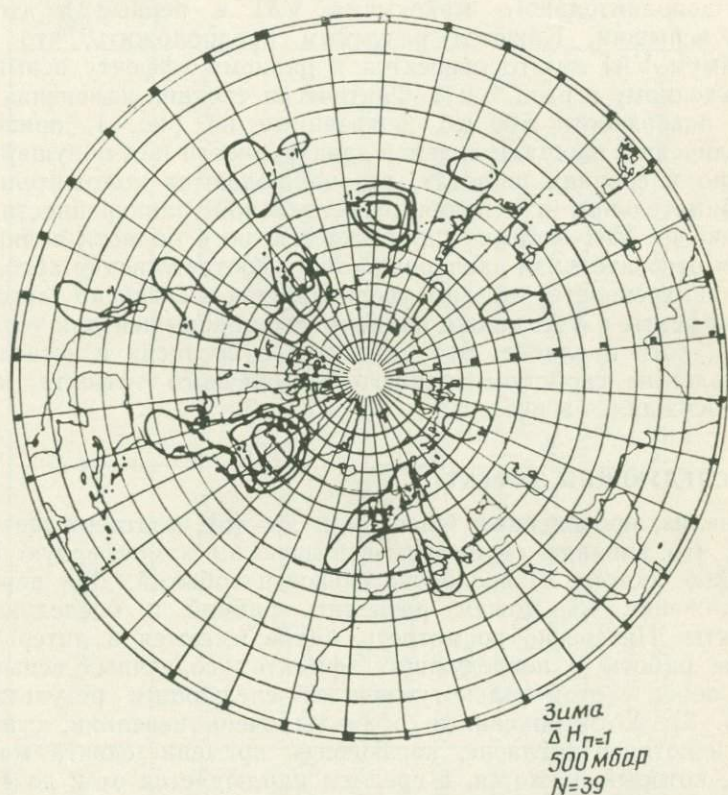


Рис. 6. Ячейки средней величины подъема высоты поверхности 500 мбар после солнечной вспышки, превосходящей 1 геопотенциальный декаметр, для холодной половины года.

4. КОСВЕННОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Олсон и др. [6] исследовали корреляцию между появлением солнечных вспышек и так называемым индексом завихренности атмосферы VAI на уровне поверхности 500 мб над северным полушарием. Этот индекс определен как площадь, над которой абсолютная завихренность превосходит определенную величину. Действительно, были изучены 24-часовые изменения VAI. Их анализ с помощью метода наложенных эпох был сделан на выборке из 94 вспышек, все наблюдения были проведены в течение холодного сезона в период 1955—1969 гг. В анало-

гичных исследованиях, основанных на использовании геомагнитных ключевых дней, авторы установили большое увеличение VAI на 3—4 сут после вспышки, но они были удивлены появлением дополнительного максимума VAI в первые и вторые сутки вспышки. Кажется разумным предположить, что этот максимум VAI как-то относится к раннему эффекту вспышки, обсужденному в разд. 2 и 3. Фактически средние изменения высоты поверхности 500 мб, показанные на рис. 1, приводят к увеличению площади сильной завихренности над полушарием. Именно в средних широтах, где наблюдаются положительные и отрицательные изменения относительной завихренности, их влияние на VAI взаимно уничтожается, но в области полярной шапки относительная завихренность (и соответственно абсолютная завихренность) сильно увеличивается. Согласно авторам [6], эффекты в VAI также найдены после вспышек для теплого сезона, хотя и слабее. Это находится в согласии с четвертым специальным свойством раннего вспышечного эффекта, который обсуждался в разд. 3.

5. ПОСЛЕДУЮЩИЙ ЭФФЕКТ

Анализ, проведенный Олсоном и др. [6], подтверждает тот факт, что влияние солнечных вспышек на атмосферную циркуляцию состоит из последовательности событий. Для первого приближения мы можем разделить ранний и последующий эффекты. Интересно посмотреть, какие имеются в литературе другие работы о последующих эффектах солнечных вспышек. Наш поиск с этой целью увенчался следующим результатом (табл. 3). Хотя описанные эффекты очень невелики, существует некоторое согласие, касающееся времени сдвига максимума, который, кажется, в среднем наблюдается от 2 до 4 сут после вспышки. Не ясно, какое иное заключение может быть вынесено из рассмотрения табл. 3. Конечно, имеется важное соответствие между упомянутыми эффектами, но много сведений об общей картине получить не удастся. Так же слабо известна и описана связь между ранним и последующим эффектами.

Тем не менее из опубликованных сведений вытекает некое доказательство, что эффект вспышки начинается через несколько часов после вспышки, продолжается в виде определенного типа воздействия в течение суток или около этого и приводит благодаря этому такие изменения в атмосфере, которые затем развиваются в определенном направлении. Впоследствии, через 2—4 сут, возникает определенный тип циркуляции, который вызывает большое число взаимосвязанных атмосферных явлений.

Последующие эффекты солнечных вспышек, освещенные в литературе

Автор	Число суток со вспышками	Период	Место наблюдения	Эффекты	Время сдвига (сутки после вспышки)
Дьюэлл и Дьюэлл [1]	51	1936—1941	Центральная Европа (3 станции)	Максимум междусуточного изменения давления	2—4
				Максимум давления	4—6
Валничек [15]	69	1936 (33) 1947 (36)	Центральная Атлантика и Европа	Солнечный эффект смещения полярного фронта; изменение от зон к меридион. циркул.	2—5
Кубышкин [4]	41	1956—1961	Северное полушарие (43 станции), Африка (9 станций)	Экстремум приземного давления *)	3—4
Шуурманс [9]	81	1957—1959	Восточная Атлантика и Европа	Максимум меридионального и блокирующего типа циркуляций	2—3
Олсон и др. [6]	94	1955—1969	Северное полушарие ($\varphi > 20^\circ \text{N}$)	Значимое уменьшение индекса завихренности атмосферы (VAI)	3—4
Рейтер [7]	103	1967—1969	Центральная Европа	Максимум атмосферных помех	2
Рейтер [7]	20—30	1967—1969	Вершины гор Ванк и Цугшпитце	Максимум градиента потенциала и тока воздух—Земля	1—3
Рейтер [7]	15—25	1957—1959	Цугшпитце	То же	1—2
Рейтер [8]	181	1967—1975	Цугшпитце	Максимум интрузий стратосферного воздуха в тропосферу	2

*) Результаты, не подтвержденные Столовом и Спаром [12] и Столовом и Шапиро [13] по Северной Америке и арктическим и антарктическим станциям соответственно.

6. СОЛНЕЧНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ

Если рассмотренный эффект вспышки реальное явление, то можно поставить вопрос о его роли в установлении солнечно-климатических связей. Эта проблема может быть изучена только в том случае, если сам эффект вспышки и, что более

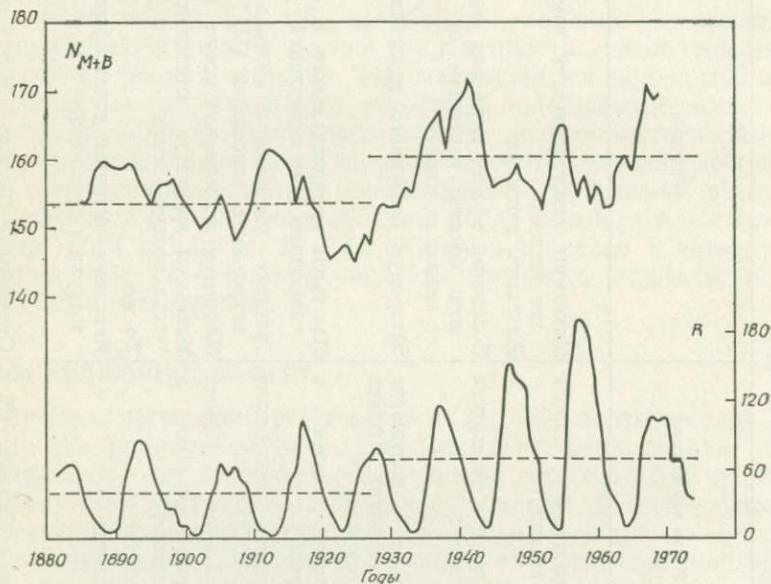


Рис. 7. Годовые средние числа солнечных пятен (нижняя кривая) и годовые числа меридионального и блокирующего типов циркуляции в Атлантико-Европейском регионе для периода 1881—1975 гг. Горизонтальные линии указывают средние значения для первой и второй половин периода.

важно, его последующие воздействия будут тщательно исследованы. Некоторые высказывают мнение, что вспышки наблюдаются слишком редко, чтобы быть полностью ответственными за такие явления, как 22-летний цикл засух [5]. Однако здесь может быть важным один аспект, а именно что вспышечный эффект инициирует и благоприятствует появлению блокирования зональной циркуляции. В связи с значительной устойчивостью блокирующей системы одна вспышка может оказывать влияние на атмосферу в течение нескольких недель, хотя действительное вторжение продолжалось только несколько часов.

Ясно, что мы знаем еще слишком мало относительно точной природы вспышечного эффекта, чтобы сказать здесь что-нибудь, кроме предположений. Можно, однако, заключить, что связь

солнечные вспышки — атмосферное блокирование заслуживает специального внимания в связи с фактом, что в течение последнего столетия солнечная активность и повторяемость блокирования в атлантико-европейской области показывают параллельный восходящий тренд [11]. Как можно видеть из рис. 7, среднегодовое число меридиональных и (или) блокирующих типов циркуляции составляет 161 за период с 1928 по 1975 г. (последние 47 лет) и 154 за период с 1881 по 1927 г. (первые 47 лет). Разность 7 статистически значима.

7. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБСУЖДЕНИЕ

7.1. РАННИЙ ЭФФЕКТ

Физический механизм, который бы объяснил наблюдаемые эффекты солнечной вспышки, еще только должен быть открыт. Около 10 лет назад автор [9] предложил цепь событий, начиная с протонов солнечной вспышки, внедряющихся в земную атмосферу на уровне нижней стратосферы и вызывающих *in situ* снижение тепла на уровне тропопаузы. Ни затронутые физические процессы, ни уменьшение тепла сами по себе пока еще не могут быть подтверждением этого механизма. Чтобы объяснить ранний эффект вспышки в тропосфере, было сделано предположение, что уменьшение тепла в нижней стратосфере дает усиление изаллобарической конвергенции воздуха, приводящей к циркуляционной системе, как показано на рис. 8. С метеорологической точки зрения такая схема допустима как объяснение значительного увеличения высоты уровней постоянного давления в тропосфере. Объяснение может быть следующим. Конвергенция вызывает сжатие и антициклогенез в тропосфере. Вертикальный профиль движения воздуха будет иметь максимум в средней тропосфере вблизи поверхности 500 мбар. Это направленное вниз движение вызывает адиабатическое повышение температуры, которое также будет наибольшим вблизи уровня 500 мб. Максимальное изменение температуры у 500 мбар вызывает максимальное изменение высоты у 300 мбар, и это точно соответствует наблюдениям.

Чтобы дать оценку необходимой конвергенции в нижней стратосфере, используем наблюдаемое температурное изменение у 500 мб после вспышки. Из изменений высоты, рассмотренных выше, мы легко вычисляем, что в среднем это температурное изменение порядка 1°C . Хартман [2] наблюдал 24-часовое увеличение температуры до 4°C (в среднем по северному полушарию) на уровне 500 мбар после солнечной вспышки 1 июня 1960 г. Поэтому мы можем осторожно предположить, что для отдельных случаев вспышек повышение тем-

пературы на уровне 500 мб порядка от 1 до 5°C. Если мы далее предположим, что эффект создается в интервале времени 6 ч, который взят для среднего случая, то направленное вниз движение будет иметь скорость 0,5—2,5 см/с. С нулевым вертикальным движением в нижней стратосфере вычисленная конвергенция имеет порядок от 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Это довольно

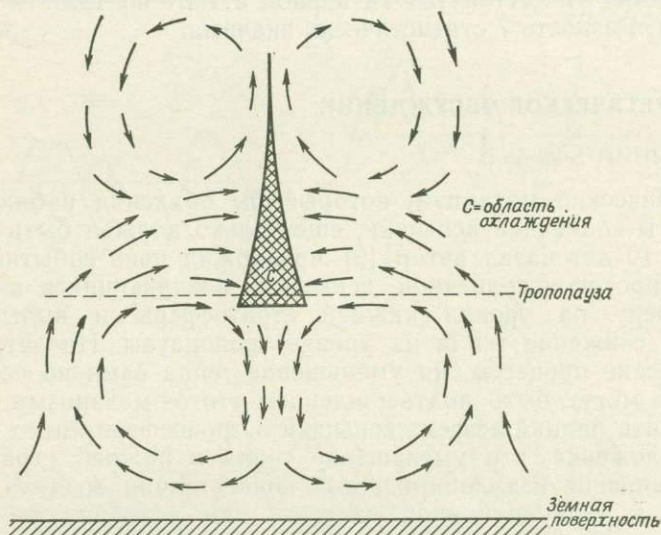


Рис. 8. Возможная циркуляционная система, приведенная в действие и поддержанная снижением температуры или другим источником конвергенции на уровнях тропопаузы и нижней стратосферы.

сильная конвергенция, но реальная. Конечно, только с помощью такой конвергенции мы можем объяснить подъем высоты после солнечной вспышки и сравнительно большие по размеру области падения высоты. Последние, однако, могли бы быть просто необходимым следствием развития процесса, в котором соблюдается требование непрерывности. Сильный аргумент, дающий преимущественно увеличением, а не уменьшением высоты, состоит в полном отсутствии вертикальных вариаций последних. Отсюда совершенно неясно, почему такой механизм, если он действительно существует, должен работать, сильнее зимой, чем летом. Возможная причина могла бы быть, вероятно, найдена в различии стратосферного циркуляционного режима зимой и летом.

7.2. ПОСЛЕДУЮЩИЙ ЭФФЕКТ

Как указано выше, поздние эффекты солнечных вспышек могут быть атмосферным следствием раннего эффекта вспышки.

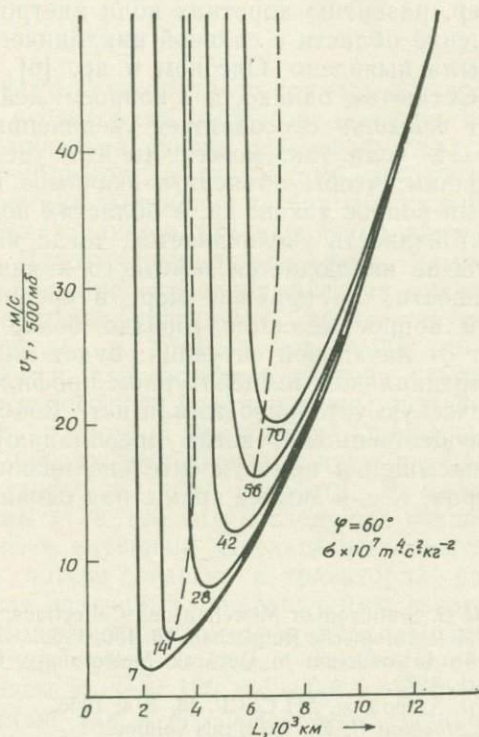


Рис. 9. Кривые устойчивости для двухуровневой бароклинной модели атмосферы при различных значениях статической устойчивости σ ; L — критическая длина волны, а U_T — вертикальный сдвиг ветра в слое между поверхностями 750 и 250 мбар.

При нынешнем состоянии вопроса можно только предполагать о сложной цепи атмосферных процессов. Из табл. 3 можно заключить, что длинные волны в западном направлении изменяются или по волновым числам, или по амплитуде, или по фазе. Такие изменения могли быть следствием изменений статической устойчивости атмосферных слоев. Как показано на рис. 9, критическая длина волны (L) для бароклинных условий сильно зависит от статической устойчивости (σ). Приведенные кривые вычислены для двухуровневой модели исходя из линейной теории, как было показано Холтоном [3]. Поскольку L

резко возрастает с $\sqrt{\sigma}$, четырехкратное изменение статической устойчивости может удвоить длину волны наиболее нестабильных волн. Другими словами, при увеличении статической устойчивости стабилизируются более короткие волны, препятствуя, например, развитию коротких волн внетропических циклонов. Уменьшение области с сильной циклонической завихренностью, как было выявлено Олсоном и др. [6], соответствует этой картине. Остаются, однако, два вопроса: действительно ли ранний эффект вспышки способствует увеличению статической устойчивости? И, если так, может ли это увеличение быть настолько большим, чтобы объяснить значимое изменение L_c ? Ответ на первый вопрос таков: да, в областях подъема высоты статическая устойчивость увеличивается, тогда как в областях падения высоты не наблюдается заметного изменения в статической устойчивости, по крайней мере в среднем. Ответ на количественный вопрос является гораздо более трудным. Он сильно зависит от начальной ситуации: будет ли определенное изменение в вертикальном температурном профиле значительно изменять статическую устойчивость или нет? Вообще изменения будут более существенными, когда преобладают адиабатические условия насыщения при относительно низких поверхностных температурах, т. е. в зимнее время, над океанами.

Литература

1. Duell B., Duell G. Smithsonian Miscellaneous Collections, **110**, No. 8, 1948.
2. Hartmann W. Meteorologische Rundschau, **16**, 150, 1963.
3. Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology, Ch. 10, Academic Press, New York, 1972.
4. Кубышкин В. В. Астрон. ж. АН СССР, **43**, 374, 1966.
5. Mitchell J. M., Stockton C. W., 1979, this volume.
6. Olson R. H., Roberts W. O., Zerefos C. S. Nature, **257**, 113, 1975.
7. Reiter R. Pure and Applied Geophys., **86**, 142, 1971.
8. Reiter R., Littfass M. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Series A, **26**, 127, 1977.
9. Schuurmans C. J. E. The influence of solar flares on the tropospheric circulation, Royal Netherlands Meteorological Institute, Mededelingen en Verhandelingen, No. 92, 1969.
10. Schuurmans C. J. E., Oort A. H. Pure and Applied Geophysics, **73**, 30, 1969.
11. Schuurmans C. J. E. Proceedings of the WMO/IAMAP Symposium on Long-Term Climatic Fluctuations, Norwich, August 1975.
12. Stolov H. L., Spar J. J. Atmos. Sci., **25**, 126, 1968.
13. Stolov H. L., Shapiro R. J. Atmos. Sci., **26**, 1355, 1969.
14. Valnicek B. Bulletin Astronomical Institute of Czechoslovakia, **4**, 179, 1953.
15. Valnicek B. Bulletin Astronomical Institute of Czechoslovakia, **3**, 71, 1952.
16. Zerefos C. S. Planet. Space Sci., **23**, 1035, 1975.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

С. Т. Ву, Л. С. Кан, Е. Тандберг-Хансен, М. Драйер

В рамках самосогласованного подхода в гидродинамическом приближении исследовано выделение энергии в земной атмосфере и динамический отклик атмосферы на ударные волны, генерируемые солнечными вспышками, и другие физические процессы, такие как высыпание частиц и локальный нагрев. Эта проблема рассматривается как начальная задача с условиями на границе. Невозмущенная атмосфера Земли задана как стационарное решение гидродинамических уравнений с подходящими граничными условиями, соответствующее реальной модели атмосферы в пределах от 50 000 км ($\sim 10R_E$) до 120 км. Считается, что солнечное явление (такое, как взаимодействие с магнитосферой ударной волны, порожденной солнечной вспышкой, и другой физической процесс) вызывает на расстоянии 50 000 км импульсное длительное увеличение плотности, температуры и (или) скорости. В модели, вплоть до нижней границы (т. е. 120 км), исследуется развитие во времени отклика на эти возмущения. Представлены результаты численных расчетов потока энергии и траекторий распространения возмущений для различных начальных импульсов, соответствующих различным физическим процессам. Обнаружилось, что величина потока энергии и время, необходимое для достижения возмущением высоты 120 км, зависят как от силы начального возмущения, так и его физической природы. Величина потока энергии составляет от 10^{-1} до нескольких эрг/см²·с, что сравнимо с потоком энергии аврорального излучения в дневном каспе. Кроме того, наши результаты показывают, что импульсом плотности возбуждаются гравитационные волны.

1. ВВЕДЕНИЕ

Идея о том, что изменяющаяся солнечная активность влияет на погоду и климат, недавно привлекла значительное внимание

S. T. Wu, L. C. Kan. The University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35807 USA;

E. Tandberg-Hanssen. Space Sciences Laboratory/NASA Marshall Space Flight Center, AL 35812 USA;

M. Dryer. Space Environment Laboratory/ERL, National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, CO 80302 USA.

научной общественности. Новые свидетельства этого влияния приведены в обзорах Робертса и Олсона [1], Кинга [2] и Уилкокса [3]. Предполагалось, что некоторые изменения в картине земной погоды могут быть связаны с определенными характеристиками потока плазмы солнечного ветра в окрестности Земли [4, 5]. Авторы [4, 5] исследовали возможные механизмы, в которых магнитосфера рассматривалась как активный или пассивный промежуточный агент между солнечной активностью и метеорологическим явлением. Чрезвычайно трудно сконструировать общую модель связи солнечная активность—магнитосфера—атмосфера, однако создание ограниченной модели такой связи возможно. В данном исследовании мы представляем описание такой модели, а также некоторые результаты, касающиеся выделения энергии в атмосфере Земли при возмущениях, вызываемых солнечной активностью.

2. МОДЕЛЬ

С целью избежать ненужной сложности, но сохранить основные физические процессы проблемы, мы считаем, что возмущение, вызванное Солнцем, вынуждено двигаться вниз вдоль магнитосферной щели. Возможность такого ограниченного стенками щели распространения возмущения возникает благодаря тому, что магнитное давление много больше давления плазмы, т. е. настоящая модель ограничивается случаем потока плазмы с малым β , где β — отношение давления плазмы к магнитному давлению, т. е.

$$p / \frac{B^2}{8\pi}.$$

Соответствующие этой задаче уравнения могут быть записаны следующим образом:

для непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} (\rho u) + \frac{\rho u}{A} \frac{dA}{ds} = 0, \quad (1)$$

для импульса

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial s} (\rho u^2 + p) + \rho u^2 \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial s} + \rho g(s) = 0, \quad (2)$$

для энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{p}{\gamma-1} + \frac{\rho u^2}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \rho u + \frac{1}{2} \rho u^3 \right) + \\ + \rho u g(s) + \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} p + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) \frac{u}{A} \frac{dA}{ds} = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

где ρ , u , A , p и γ — соответственно плотность, скорость, площадь поперечного сечения, давление и постоянная адиабаты; все величины являются функциями координат и времени. Независимые переменные здесь s и t , где s представляет собой расстояние, измеряемое от поверхности Земли, а t — время. Наконец, сила тяжести задается в виде

$$g(s) = G \left(\frac{R_E}{s} \right)^2, \quad (4)$$

где G — сила тяжести на поверхности Земли и R_E — радиус Земли. Используются законы для идеального газа и считается, что площадь поперечного сечения $A \sim s^2$.

Чтобы найти зависящие от времени численные решения приведенной выше системы уравнений для возмущенной атмосферы (уравнения (1) — (3)), мы сначала найдем стационарное решение. Для этого рассмотрим спокойную в начальный момент атмосферу ($u = 0$ везде при $t = 0$), положив

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

в уравнениях (1) — (3) и выполнив отдельно интегрирование уравнений стационарного состояния, задав предварительно ρ , T и u на внешней и внутренней границах: $\rho = 4,34 \cdot 10^{-23}$ г/см³, $T = 420$ К на 50 000 км и $\rho = 2,34 \cdot 10^{-11}$ г/см³, $T = 334$ К на 120 км. Эти условия были выбраны в соответствии с данными наблюдений при температуре термопаузы 1000 К, приведенными у Бэнкса и Кокартса [6]. После того как мы определили условия для стационарного состояния, ищем зависящее от времени решение, используя модифицированный метод Лакса—Вендрофа, детальное описание процедуры вычислений можно найти в [7].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Задаем на внешней границе (50 000 км $\approx 10R_E$ над Землей) возмущения, порожденные солнечной активностью, и прослеживаем эти возмущения на их пути в нижнюю атмосферу. Численные результаты вычислений подытожены для трех разных физических причин: 1) импульс плотности, 2) импульс температуры и 3) ударные волны. С наблюдательной точки зрения импульс плотности может быть отождествлен с высыпанием частиц, импульс температуры соответствует локальному нагреву и ударная волна — генерируемым в солнечных вспышках ударным волнам.

На рис. 1 показаны траектории, рассчитанные для импульсов плотности, температуры и для ударных волн. Взяты импульсы большой длительности, т. е. в течение всего вычисления величина импульса была постоянной. Ясно видно, что для ударной волны получается самое быстрое распространение, следующий за ней по величине скорости — импульс температуры

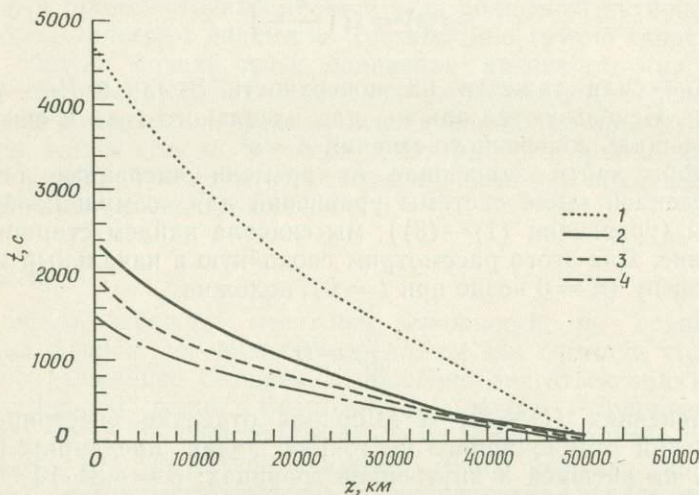


Рис. 1. Рассчитанные траектории распространения возмущений, возникших на высоте 50 000 км ($\sim 10 R_E$) под воздействием импульсов плотности, температуры и ударных волн. 1 — импульс плотности, $\Delta\rho=200$; 2 — импульс температуры, $\Delta T=200$; 3 и 4 — ударная волна, $M_s=15$ и $M_s=20$ соответственно.

и наиболее медленное распространение — у импульса плотности. Заметно также, что чем больше импульс, тем быстрее он распространяется. На рис. 2 показан временной ход потоков энергии на 300 км для четырех различных импульсов, длинные «хвосты» на графике возникают вследствие бесконечно большой длительности возмущающих импульсов. На рис. 3 для момента $t=1500$ с дана мгновенная картина пространственной структуры потоков энергии, возникающих при этих четырех импульсах. Мы видим, что возмущение, порожденное импульсом от ударной волны с числом Маха $M_s=20$, уже достигло нижней атмосферы, поток энергии, выделяющейся выше 1000 км, существует из-за отраженной волны. Эта ситуация показана на рис. 4, где мы построили пространственное распределение скоростей потока плазмы в четыре различных момента времени. Заметим, что в момент $t=1440$ с скорость

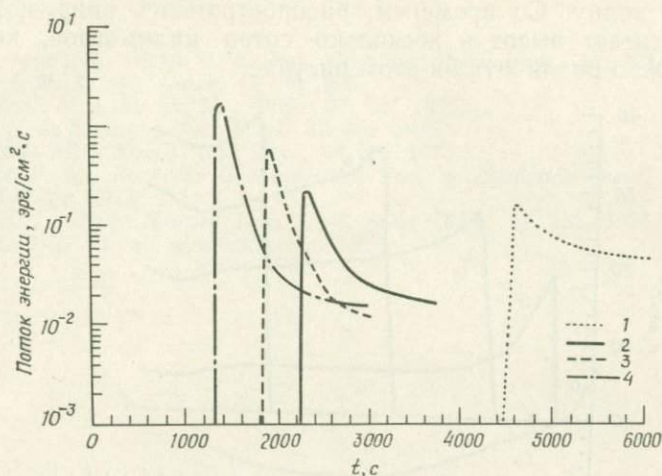


Рис. 2. Поток энергии на 300 км в зависимости от времени. Обозначения, как на рис. 1.

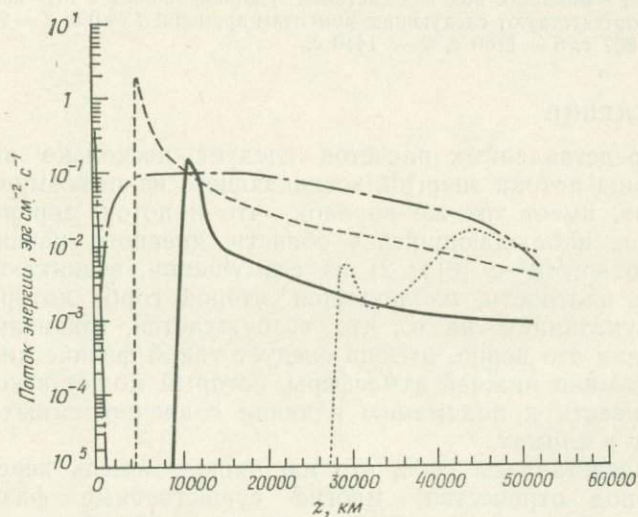


Рис. 3. Распределение по высоте в момент $t=1500$ с потоков энергий, возникших под воздействием импульсов плотности, температуры и ударных волн. Обозначения те же, что на рис. 1.

отрицательна, т. е. направлена вверх, что указывает на отраженную волну. Со временем, распространяясь вниз, возмущение достигает высот в несколько сотен километров, которые невозможно различить на этом рисунке.

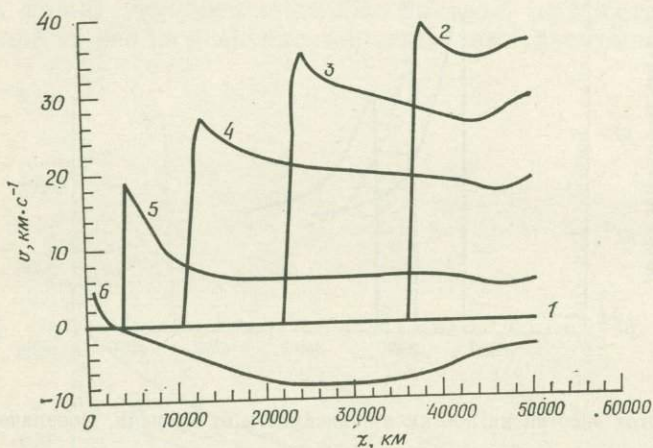


Рис. 4. Распределение по высоте в различные моменты времени скоростей потоков плазмы, возникших под воздействием ударной волны с $M_s=20$. Цифры у кривых соответствуют следующим моментам времени: 1 — 0 с, 2 — 292 с, 3 — 579 с, 4 — 867 с, 5 — 1160 с, 6 — 1440 с.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Из представленных расчетов следует несколько выводов: 1) величина потока энергии, возникающего из-за возмущающих импульсов, имеет тот же порядок, что и поток аврорального излучения, наблюдающийся в области дневного каспа (т. е. несколько эрг/см²·с [8]); 2) на возмущении, возникающем от импульса плотности, наблюдается второй горб, который мы считаем указанием на то, что возбуждается гравитационная волна. Если это верно, отсюда следует такой физический механизм динамики нижней атмосферы, который может в конечном счете привести к пониманию влияния солнечно-земных связей на погоду и климат.

Мы представляем себе, что настоящая модель переживает еще период отрочества, многие существенные физические моменты в ней опущены. Однако мы полагаем, что ее достоинством является систематический подход к решению проблемы с точки зрения динамики.

Работа выполнялась при поддержке Центра космических полетов им. Маршалла, НАСА, по контракту NAS8—28097.

Литература

1. *Roberts W. O., Olson R. H.* Rev. Geophys. Space Phys., **11**, 731, 1973.
2. *King J. W.* Astron. Aeron., **13**, 10, 1975.
3. *Wilcox J. M. J.* Atmos. Terr. Phys., **37**, 237, 1975.
4. *Cole K. D. J.* Atmos. Terr. Phys., **37**, 939, 1975.
5. *Willis D. M. J.* Atmos. Terr. Phys., **38**, 685, 1976.
6. *Banks P. M., Kockarts G.* Aeronomy, Part B, Academic Press, New York and London, 1973.
7. *Wu S. T., Dryer Murray, Han S. M.* Solar Phys., **49**, 187, 1976.
8. *Evans D. S.* Private communication, 1978.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО 22-ЛЕТНЕГО РИТМА ЗАСУХ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ США, СВЯЗАННЫХ С СОЛНЕЧНЫМ ЦИКЛОМ ХЭЙЛА НАЧИНАЯ С XVII В.

Дж. М. Митчелл мл., Ч. У. Стоктон, Д. М. Мeko

Для части США западнее Миссисипи были получены серии рядов региональных индексов засух (DAI) для каждого года с помощью данных по кольцам деревьев, начиная с 1700 или 1600 г. в зависимости от использованных данных. Каждый тип индекса DAI выражен в виде относительной величины площади, захваченной засухами, для которых Пальмеровский индекс суровости засух (PDSI) лежит ниже точно определенного порогового значения, заключенного между -1 (слабая засуха) и -4 (сильная засуха). Три серии рядов DAI проанализированы в этой работе, каждая серия основана на реконструкциях, выполненных по кольцам деревьев, взятых из 40—65 мест, расположенных от Канады до Мексики и от западного берега до равнинных штатов. Спектральный анализ дисперсий рядов DAI показывает увеличение вариаций с периодами около 22 лет с уровнем значимости от 5 до 0,1 % (относительно «розового» шума). Полосовые фильтры, настроенные для периодов вблизи 22 лет, используются в форме гармонического цифрового анализа, предложенного Брайером для подтверждения степени синхронизации фаз между изменениями площади засух и хэйловским циклом начиная с 1700 г. Синхронизация фаз подтверждена с уровнем значимости порядка от 1 до 0,1 % для всех серий рядов DAI и всех индексов суровости засух, за исключением сильных засух ($PDSI < -4$). Найдена тенденция для изменения амплитуды 22-летнего ритма засух, которая систематически изменялась параллельно с амплитудой огибающей циклов Хэйла за временной период Глайсберга около 90 лет. Эта связь статистически значима между 5 и 1 % уровнями и не зависит от фазовой синхронизации, найденной для отдельных хэйловских циклов. Ряды DAI, которые «протянуты» до 1600 г., отражают хорошо выраженный 22-летний ритм засух в течение ранних стадий минимума Маундера солнечной активности, но очень слабый ритм вблизи конца минимума Маундера. Средняя величина площади, захваченной засухами, была относительно низкой и оставалась низкой для пролонги-

J. M. Mitchell, Jr. NOAA Environmental Data and Information Service, Silver Spring, MD 20910 USA.

C. W. Stockton, D. M. Meko. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, AZ 85721 USA.

рованного периода в течение минимума Маундера. Этот анализ хорошо подтверждает более ранние указания на существование 22-летнего ритма, или «цикла», засух в США и наводит на мысль, что ритм засух определенным образом контролируется долгопериодной солнечной изменчивостью, прямо или косвенно связанной с солнечными магнитными эффектами. Солнечный контроль наилучшим образом описывается как модуляция земных механизмов, вызывающих засуху, подобно тем, которые попеременно способствуют развитию больших континентальных засух, возникающих за счет эволюционирующих климатических процессов, не связанных с солнечной активностью.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эта статья отражает результаты работ, начатых в 1976 г. по исследованию и реконструкции истории засух в западной части США с помощью данных, полученных по анализу колец деревьев; цель ее — подтвердить ранние указания о существовании действительного «цикла» засух и об их связи с солнечными циклами. Поскольку исследовательские результаты по первичным данным не были еще подготовлены для публикации, мы кратко опишем природу использованных данных, прежде чем перейти к обсуждению результатов анализа данных. В этой работе мы ограничимся только нашими основными результатами и оставим рассмотрение ряда подкрепляющих исследований и дальнейшие результаты для других статей, которые готовятся к изданию.

2. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ ЗАСУХ

Несколько лет тому назад двое из нас — Стоктон и Меко —, следуя методу, намеченному Фриттсом и др. [3], применили многовариантный подход к реконструкции картины засух в западных штатах (на запад от Миссисипи) по большой коллекции образцов колец деревьев в лаборатории Аризонского университета. Для характеристики засух использовались значения индексов суровости засух Пальмера (PDSI) [8] из Национального климатического центра НОАА по материалам 208 государственных климатологических округов за период между 1931 и 1970 г., которые были объединены в 40 областей, показанных на рис. 1, А. Индексы колец деревьев были выбраны по 40 пунктам, для которых была известна чувствительность к локальным климатическим вариациям различных видов (зависящим также от вида дерева и освещения [4]) с учетом подходящего воз-

раста дерева и разумного географического расположения (рис. 1, Б). Анализ собственных векторов был затем выполнен на пространстве индексов PDSI между 1931 и 1970 гг. и неза-

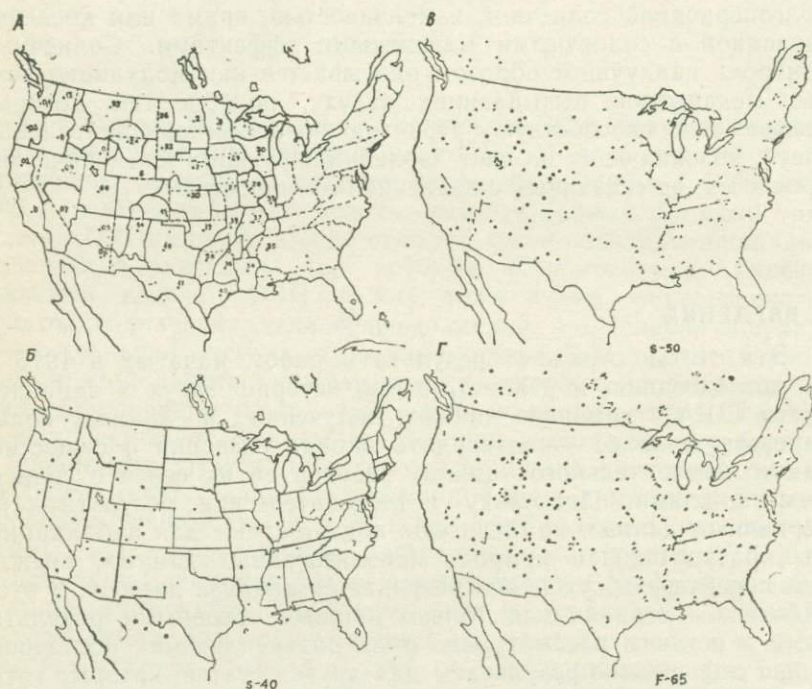


Рис. 1. Территория анализируемых засух, на которой основано это исследование. А — части территории со сплошными границами и числами внутри обозначают 40 климатических областей, для которых наблюдался или выводился индекс суровости засух Пальмера (PDSI). Б — расположение 40 пунктов, по которым данные о кольцах деревьев были использованы для реконструкции данных по засухам в серии рядов DAI S-40 начиная с 1700 г. В — расположение 50 пунктов, по которым данные о кольцах деревьев были использованы для реконструкции данных по засухам в серии рядов DAI S-50 начиная с 1601 г. Г — расположение 65 пунктов, по которым данные о кольцах деревьев были использованы для реконструкции данных по засухам в серии рядов DAI F-65 начиная с 1600 г.

висимо на пространстве индексов колец деревьев между 1700 и 1962 гг. (последний год измерений колец деревьев). В каждом из двух пространств было выбрано несколько собственных векторов, которые составляют наибольшую часть общей дисперсии данных. Коэффициенты собственных векторов обоих пространств для перекрывающегося интервала времени (с 1931

по 1962 г.) были затем соотнесены путем канонического анализа [1, 7]. Этот канонический «мост» между рядами индекса засух PDSI и рядами индекса колец деревьев был затем использован с тем, чтобы восстановить значение PDSI для каждой из 40 климатических областей на рис. 1, А для каждого года с 1700 по 1962 г. Затем четыре индекса DAI были рассчитаны для каждого года в этом интервале времени. Первый индекс DAI для данного года есть просто число тех климатических районов (из 40), в которых реконструированное значение PDSI было меньше -4 (наиболее сильные засухи по определению Пальмера). Другие DAI соответствуют числу климатических районов, в которых PDSI было меньше -3 («суровая» засуха), меньше -2 («умеренная» засуха) и меньше -1 («слабая» засуха). Общее описание использованных процедур, графики рядов значений DAI ($PDSI < -1$), а также сравнительные оценки «влажных районов» по пальмеровскому индексу ($PDSI > +1$) были опубликованы Стоктоном и Меко [9].

За первой реконструкцией засух, указанной выше, были предприняты две другие реконструкции, использующие те же данные по засухам, но другой выбор мест взятия образцов колец деревьев, для которых индексы колец были получены с 1600 г. Эти дополнительные реконструкции, обозначенные в этой работе как S-50 и F-65 [5] (рис. 1, В и 1, Г), были сделаны главным образом по двум причинам. Во-первых, особый интерес проявляется к состоянию засух в течение XVII в. (см. ниже). Во-вторых, необходимо было подтвердить правильности реконструкций засух на основании использования одних лишь индексов колец деревьев, чтобы убедиться в том, что передача информации от колец деревьев к статистике засух не чувствительна к выбору мест, где были взяты образцы деревьев. (Таким путем была подтверждена высокая степень надежности, относящаяся по крайней мере к вариациям DAI за периоды, заметно большие, чем 1 или 2 года, которых мы в основном касаемся здесь.)

В целом у нас есть три серии рядов с четырьмя видами DAI, по одному для каждого из отмеченных четырех пределов PDSI. Дальнейшая информация об этих реконструкциях DAI суммирована в табл. 1. Здесь, как и в последующих частях этой работы, разные ряды DAI отмечаются разными буквенно-численными комбинациями, в которых число отождествляется с числом мест отбора образцов колец деревьев, использованных в этой реконструкции. Первичные данные DAI, описанные в [6], выражены здесь как серия S-40. Графики для трех рядов этой серии DAI показаны с помощью вертикальных отрезков на рис. 2 (для $PDSI < -1$, < -2 и < -3).

Реконструкция областей засух

Серия DAI	Индексы колец деревьев				Индексы засухи (PDSI)			
	период регистрации	число пунктов	сохраненные EVs *)	объясненная дисперсия	период регистрации	число пунктов	сохраненные EVs	объясненная дисперсия
S-40	1700—1962	40	6	45 %	1931—1970	40	5	75 %
S-50	1601—1962	50	2	31 %	1931—1970	40	7	83 %
F-65	1600—1962	65	3	41 %	1931—1970	40	5	75 %

Канонический «мост»

Серия DAI	Сохраненные члены ***)	Дисперсия в целом
S-40	5	64 %
S-50	6	56 %
F-65	5	65 %

Объясненная дисперсия DAI **)
Предел PDSI

< -1	< -2	< -3	< -4
72 %	72 %	74 %	78 %
67 %	76 %	79 %	75 %
69 %	70 %	79 %	74 %

*) EVs — собственные векторы (главные компоненты)

**) В перекрывающемся периоде 1931—1962 гг. (32 г.)

PDSI — индекс суровости засух Пальмера,
DAI — региональный индекс засух.

***) Максимальное число членов, сохраненных для канонической корреляции, не может превосходить наименьшего числа собственных векторов EVs, сохраненных в каждом ряду индексов [1]. Противоположные этому случаи в таблице объясняются следующим образом. Во всех рядах DAI коэффициенты собственных векторов EV засух (амплитуды) для года t относятся к EV-коэффициентам колец деревьев для двух лет t и $t+1$. В случае серии S-50 коэффициенты засух для года t дополнительно относятся к коэффициентам колец деревьев для года $t-1$. Для пояснения этой процедуры сдвига см [10].

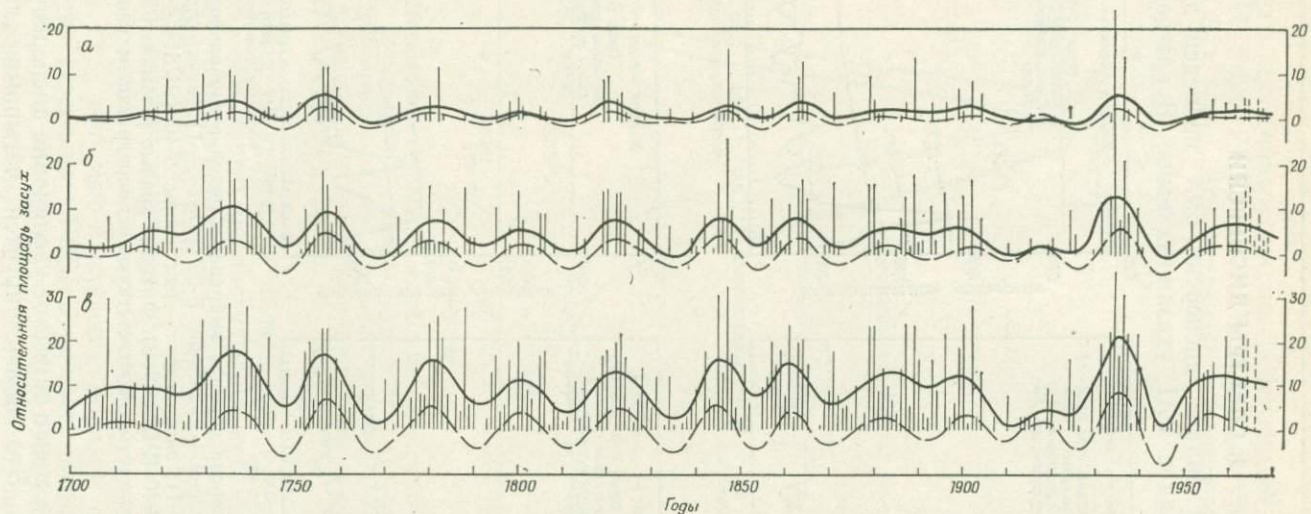


Рис. 2. Изменение во времени площадей засух (число районов из 40) для трех пределов PDSI, основанных на реконструкции серии DAI S-40 с 1700 по 1962 г. и наблюдаемых значениях после 1962 г. Вертикальные отрезки обозначают первичные реконструкции. Нижняя волнистая линия на каждом уровне обозначает ряды после фильтрации полосовым фильтром № 1 (см. текст). Верхняя волнистая линия на каждом графике обозначает ряды после фильтрации низкочастотным фильтром.

3. СПЕКТРЫ ДИСПЕРСИИ

Спектральный анализ дисперсий был проведен для большинства из 12 рядов DAI, указанных выше. В каждом случае

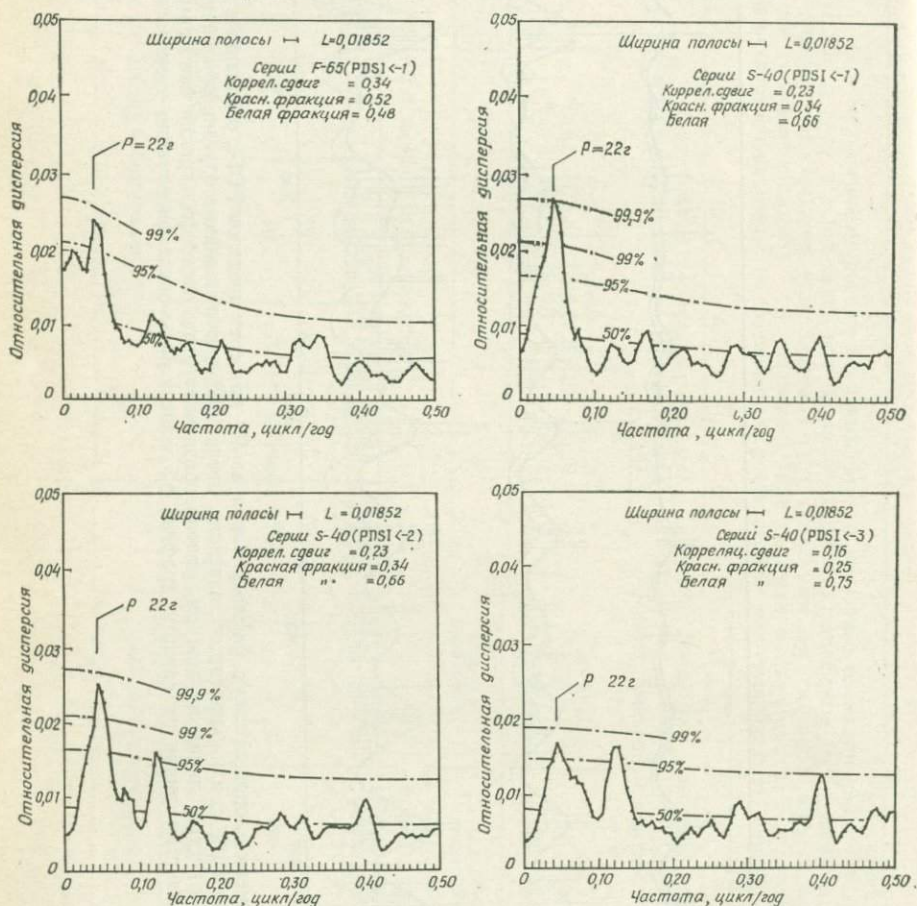


Рис. 3. Спектры дисперсии четырех выбранных рядов регионального индекса засух (DAI): *вверху слева* — ряд серии F-65 (PDSI <-1); *вверху справа* — ряд серии S-40 (PDSI <-1); *внизу слева* — ряд серии S-40 (PDSI <-2); *внизу справа* — ряд серии S-40 (PDSI <-3). Фоновые кривые указывают выбранные континуумы «розового» шума, соответствующие определенным уровням значимости.

найдено более или менее заметное увеличение дисперсии вблизи периода 22 года. Это иллюстрируется четырьмя спектрами, показанными на рис. 3. Три из этих спектров соответствуют

трем рядам, нанесенным на рис. 2. Четвертый спектр из другой серии DAI, F-65 ($PDSI < -1$), показан для сравнения с серией S-40 ($PDSI < -1$). Для проверки статистической значимости

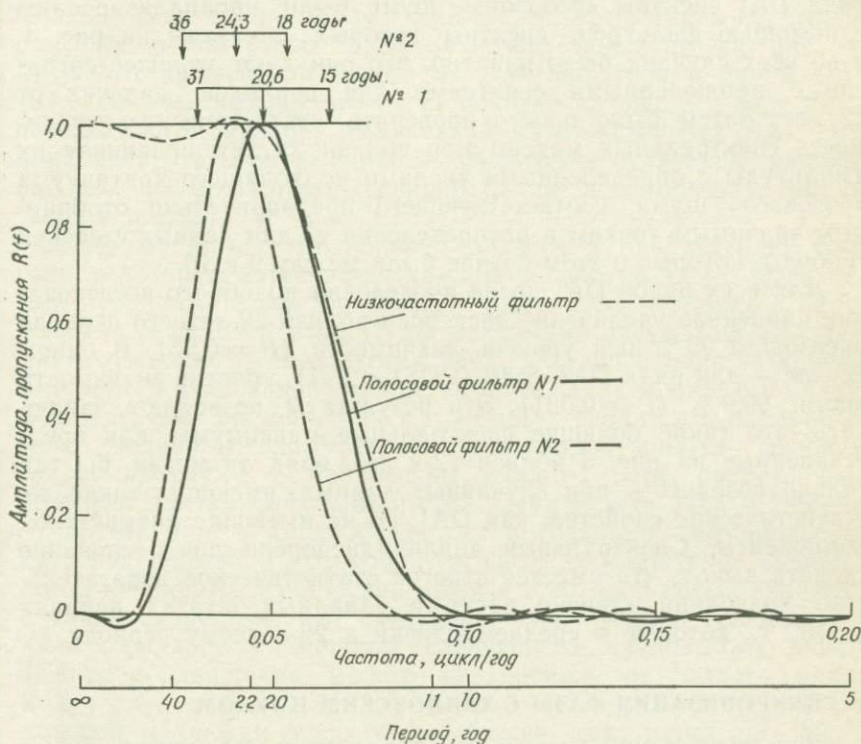


Рис. 4. Частотные характеристики полосового фильтра № 1 (сплошная кривая), полосового фильтра № 2 (жирная пунктирная кривая) и низкочастотного фильтра, примененного на рис. 2 (тонкая пунктирная кривая). Точки максимума пропускания и половины максимума указаны сверху для обоих полосовых фильтров (периоды в годах).

спектральных максимумов вблизи 22 лет необходимо точно определить некоторый реалистический континуум для нулевой гипотезы, чтобы сравнить с каждым спектром. Структура автокорреляции с малым сдвигом ясно показывает, что соответствующий нулевой континуум не является ни белым, ни красным шумом [6], но скорее сочетанием (следуя терминологии Тьюки и др.), который наилучшим образом описан как «розовый» шум. Поскольку PDSI отражает накопление подповерхностной влаги в прошлом, то можно ожидать, что его поведение во времени сходно с марковским процессом первого порядка, а так как оценка PDSI по данным колец деревьев вводит

ошибки оценки PDSI, то они подобны случайным ошибкам от года к году (например, белый шум).

На основе автоковариаций с малым сдвигом для каждого ряда DAI спектры «розового» шума были проанализированы с помощью фильтров, спектры которых показаны на рис. 4, и во всех случаях было найдено, что они дают хорошее согласие с наблюдаемыми спектрами для периодов, далеких от 22 лет. Затем было просто проверить статистическую значимость спектральных максимумов вблизи 22 лет, сравнивая их амплитуды с определенными числами подходящего континуума «розового» шума, соответствующего предварительно отобраным значимым точкам в распределении χ^2 для данных степеней свободы, которые в этом случае были между 9 и 10.

Для всех рядов DAI после проведения подобного исследования найденное увеличение дисперсии вблизи 22-летнего периода превзошло 95 %-ный уровень значимости ($P=0,05$). В одном случае — для ряда DAI, S-40 ($PDSI < -1$), уровень значимости достиг 99,9 % ($P=0,001$). Эти результаты позволяют заключить, что такие большие спектральные максимумы, как представленные на рис. 3 вблизи 22-х лет, вряд ли могли бы так сильно возрастать при случайных данных, имеющих такие же статистические свойства, как DAI, но не имеющие ритмической компоненты. Спектральный анализ дисперсии дает основание сделать вывод, что имеется строгое статистическое доказательство колебаний степени засух в западных штатах начиная с 1700 г., которые в среднем близки к 22-летнему периоду.

4. СИНХРОНИЗАЦИЯ ФАЗЫ С ХЭЙЛОВСКИМ ЦИКЛОМ

При обсуждении возможных объяснений 22-летнего ритма засух не вызывает удивления желание внимательнее рассмотреть обычный хэйловский цикл и попытаться найти подходящую меру той согласованности, с которой ритм засух «идет в ногу» с хэйловским солнечным циклом начиная с 1700 г. Такая мера первоначально была предложена Брайером [2]. Она идеально подходит для такой ситуации, когда рассматривается скорее нечеткий ритм, чем строгая периодичность, и когда независимая переменная (солнечные циклы) подобна нечеткому ритму. Начальным пунктом анализа была фильтрация рядов DAI с помощью полосового фильтра, предназначенного для пропускания с очень малой потерей точности любой вариации в рядах не только для выбранного, но также любых других периодов между половиной выбранного периода и удвоенным периодом. Таким путем даже очень нерегулярную квазипериодичность или ритм можно проследить как функцию времени, равно любые изменения фазы, периода и (или) ампли-

туды, а также установить моменты, когда они наблюдаются (если они наблюдаются).

Согласно методу Брайера [2], для этого анализа были использованы два полосовых фильтра, которые имели некоторое различие в частотных профилях, как показано на рис. 4. Результат применения одного из этих фильтров к рядам DAI (он обозначен как фильтр № 1) показан на рис. 2 в виде нижней волнистой кривой, наложенной на каждый ряд DAI. Это показывает некоторую гибкость фильтра в отражении изменений как фазы (или длины волны), так и амплитуды ритма засух в рядах.

Следующий шаг в анализе сводится к определению того года, в который встречается каждый максимум засух, выделенный путем полосовой фильтрации рядов DAI, а также к определению локальной амплитуды максимума засух. Год каждого максимума соотнесен с датами двух следующих один за другим минимумов хэйловского цикла, которые заключают его в вилку, а определение времени максимума засух сводится к измерению угла (величины азимута), который характеризует фазовую связь максимума с хэйловским циклом. Этот процесс был повторен для каждого максимума засух между 1700 и 1962 гг.

Третий шаг в анализе состоит в создании гармонической круговой шкалы, в которой нуль фазы соответствует времени, когда начинается хэйловский цикл, и в которой время движется с такой скоростью, что следующее прохождение фазы через нуль совпадает с началом следующего хэйловского цикла. (Скорость движения может варьировать от одного цикла к другому, если длина цикла изменяется.) В этой системе каждый максимум засух был нанесен как точка на шкале с фазой, соответствующей времени его появления относительно начала и окончания хэйловского цикла, и с расстоянием от центра круга, пропорциональным его амплитуде. Результат этой процедуры напоминает простреленную мишень в тире (рис. 5).

Конечный шаг в анализе сводится к вычислению положения центра масс точек, соответствующих положению максимумов засух на круговой гармонической шкале, и оценке статистической значимости расстояния этого центра от центра круга. Если бы не было систематической связи между данными о засухах и фазой хэйловского цикла, то можно было ожидать, что распределение максимумов засух будет более или менее равномерно относительно центра круга. Однако существует постоянная тенденция для максимумов засух концентрироваться в первом квадранте круга или, другими словами, преимущественно наблюдаться в первые несколько лет после минимума хэйловского цикла. Значимость этой концентрации может

быть оценена путем прямого анализа дисперсии точек, включая положение центра масс. Это было сделано с помощью F -теста. Хотя ширина использованного здесь полосового

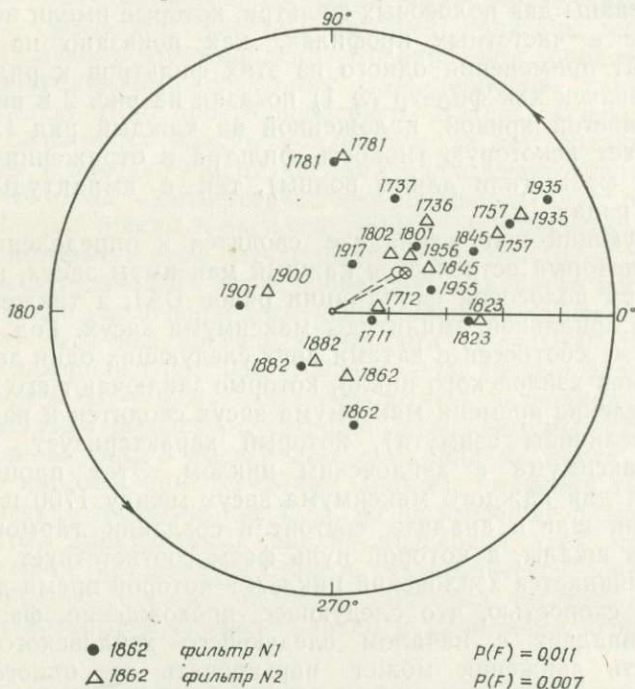


Рис. 5. Анализ по гармонической круговой шкале ряда DAI S-40 ($PDSI < -1$) относительно фазы хэйловского цикла (см. текст). Результаты показаны для фильтра № 1 (темные кружки) и фильтра № 2 (светлые треугольники). Указаны даты каждого максимума DAI. Центры масс точек для фильтра № 1 (кружок с крестиком) и фильтра № 2 (светлый кружок) соединены пунктирными линиями с центром круга. Начало и конец каждого хэйловского цикла соответствуют азимуту 0°. Время отсчитывается против часовой стрелки.

фильтра больше, чем средний интервал времени между последовательными максимумами засух, тем не менее при применении F -теста необходима коррекция для уменьшения степеней свободы, связанная с внутригрупповой дисперсией. В самом худшем случае это составит уменьшение около 45 % для использованных фильтров, такую коррекцию мы применяли для всех случаев.

Раньше было отмечено, что два различных полосовых фильтра применялись при обработке рядов DAI. Гармонический анализ был повторен для каждого ряда DAI с использованием обоих фильтров. Один фильтр обладал максимумом для выделения периода около 20,6 года, другой — около 24,3 года. Если

бы сами фильтры были ответственны за проявление ритмики в ряде, к которому они применялись, более чем присущие самим рядам ритмы, то применение одного фильтра приводило бы на гармонической круговой шкале к систематическому дрейфу по часовой стрелке около 30° между последовательными максимумами засух, применение же другого фильтра приводило бы к подобному движению против часовой стрелки. Фактически применение обоих фильтров дало близкий результат в распределении точек на круге с почти идентичным положением центра масс. Пример показан на рис. 5. Это ясно указывает, что результаты анализа по гармонической шкале не очень чувствительны к выбору фильтра и никакая искусственная периодичность, которую может внести любой фильтр, не может объяснить группирование точек на круговой шкале. Результаты этих анализов для всех DAI, приведенные в табл. 2, указывают, что фильтр № 2 (с максимумом около 24,3 г.) чуть-чуть более

Таблица 2

Анализ по гармонической шкале для отдельных серий DAI

Предел PDSI	Серия DAI	Фильтр №	Число максимумов	Центр масс точек			Значение F	Значимость P (F)**
				фаза	сдвиг*)	ампл.		
-1	S-40	1	13	29	(1,8)	2,87	6,48	0,011
	S-50	1	13	42	(2,6)	3,02	8,92	0,004
	F-65	1	13	42	(2,6)	3,81	12,42	0,001
	S-40	2	12	32	(2,0)	2,80	7,70	0,007
	S-50	2	12	42	(2,6)	2,95	10,74	0,002
	F-65	2	12	41	(2,5)	3,93	22,39	0,0001
-2	S-40	1	13	26	(1,6)	1,95	6,85	0,009
	S-50	1	14	31	(1,9)	1,83	6,10	0,012
	F-65	1	14	34	(2,1)	1,88	6,67	0,009
	S-40	2	12	27	(1,7)	1,94	8,58	0,005
	S-50	2	12	29	(1,8)	1,99	9,52	0,003
	F-65	2	13	32	(2,0)	1,87	9,09	0,003
-3	S-40	1	13	24	(1,5)	0,93	5,98	0,014
	S-50	1	14	21	(1,3)	0,97	4,58	0,029
	F-65	1	14	29	(1,8)	0,95	4,56	0,030
	S-40	2	12	22	(1,4)	0,86	6,56	0,012
	S-50	2	12	23	(1,4)	1,00	6,09	0,015
	F-65	2	12	27	(1,7)	1,01	6,06	0,015
-4	S-40	1	12	358	(-0,1)	0,39	3,44	0,066
	S-50	1	12	17	(1,0)	0,43	2,99	0,088
	F-65	1	14	35	(2,1)	0,18	0,53	0,600
	S-40	2	11	355	(-0,3)	0,39	4,24	0,043
	S-50	2	12	17	(1,0)	0,37	3,59	0,060
	F-65	2	13	19	(1,2)	0,17	0,65	0,540

*) Сдвиг в относительных годах после хэйловского цикла.

**) Значения, исправленные за перекрытие фильтра.

эффективен, чем фильтр № 1 (максимум около 20,6 г) в выявлении синхронизации фаз, которая, очевидно, существует во всех 12 рядах.

Мы заключаем из такого анализа, что имеется строгое доказательство систематической синхронизации фазы между 22-летним ритмом крупных засух в западных штатах и хэйловскими циклами начиная с 1700 г. Фазовое соотношение таково, что максимумы засух преимущественно появляются внутри первых двух или трех лет, следующих за минимумом хэйловского цикла (т. е. следующих за перемежающимися минимумами 11-летних циклов, включая минимум 1976 г.). Статистическая значимость результата лучше, чем 1 % для $PDSI < -1$ и < -2 , около 1 или 2 % для $PDSI < -3$ и около 10 % для $PDSI < -4$.

5. ДОЛГОПЕРИОДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ АМПЛИТУДЫ РИТМА ЗАСУХ

При исследовании рядов DAI после полосовой фильтрации применение анализа по гармонической шкале показало, что амплитуды последовательных максимумов засух изменялись во времени сходным образом с изменением амплитуды солнечных циклов за время периода Глайсберга. Чтобы проверить, является ли эта связь реальной, мы исследовали каждый ряд DAI с помощью коэффициентов корреляции между амплитудой каждого максимума засух (после фильтрации обоими фильтрами отдельно) и огибающей хэйловских циклов в периоды этих максимумов. При этом мы не включили максимум засух около 1955 г. потому, что он пришелся слишком близко к концу рядов DAI (1962 г.), чтобы позволить удовлетворительно оценить его амплитуду с помощью использованных фильтров. Результаты этого корреляционного анализа показаны для всех рядов DAI для обоих фильтров в табл. 3. В ней показаны также корреляции для средних максимумов DAI как для каждого предела PDSI, так и корреляции для средних, включающих более чем один предел PDSI. Эти средние были выведены сначала путем изменения масштабов всех максимумов засух начиная с 1700 г. для данных рядов DAI и данного фильтра, так чтобы средняя амплитуда максимума засух для этих рядов DAI и фильтра были равны единице, а затем путем объединения результатов более чем для одного ряда DAI. В случае когда средние включали более чем один предел PDSI, значения амплитуды засух (после изменения масштаба) были «взвешены» в обратной пропорции к пределу PDSI в каждом случае. Это означает, например, что в итоговом среднем, приведенном в нижней части табл. 3, среднее было получено при усреднении значений $PDSI < -1$ с весом 1, значений $PDSI <$

Таблица 3

Корреляция между амплитудой цикла засух и огибающей хэйловских циклов *) 1700—1962 гг.

Предел PDSI	Серия DAI	Фильтр № 1			Фильтр № 2		
		число максимумов	коэффиц. коррел.	уровень значимости	число максимумов	коэффиц. коррел.	уровень значимости **)
-1	S-40	12	0,645	0,05	11	0,548	—
	S-50	12	0,683	0,02	11	0,685	0,02
	F-65	12	0,365	—	11	0,209	—
	Все ***)	13	0,652	0,02	13	0,517	—
-2	S-40	12	0,555	—	11	0,557	—
	S-50	12	0,571	—	11	0,554	—
	F-65	12	0,550	—	12	0,386	—
	Все ***)	12	0,583	0,05	13	0,518	—
-3	S-40	12	0,522	—	11	0,554	—
	S-50	12	0,544	—	11	0,634	0,05
	F-65	12	0,555	—	11	0,456	—
	Все ***)	12	0,600	0,05	12	0,518	—
-4	S-40	11	0,511	—	10	0,506	—
	S-50	11	0,770	0,01	11	0,776	0,005
	F-65	12	0,338	—	11	0,371	—
	Все ***)	12	0,639	0,05	12	0,589	0,05

«Взвешенные средние»

-1 до -2	Все ***)	13	0,682	0,02	13	0,522	—
-1 до -3	Все ***)	13	0,697	0,01	13	0,560	0,05
-1 до -4	Все ***)	13	0,712	0,01	13	0,588	0,05

*) Огибающая хэйловских циклов, отфильтрованная фильтром № 1.

**) Двойной тест (уровень значимости 0,05 или выше).

***) Среднее всех нормированных DAI для указанных пределов PDSI.

< -2 с весом $1/2$, $PDSI < -3$ с весом $1/3$ и значений < -4 с весом $1/4$. Это было сделано потому, что для более высоких (отрицательных) пределов PDSI данные находятся более близко к уровню шума, чем низшие. Табл. 3 показывает, что эти «взвешенные средние» имеют заметно лучшие корреляции с огибающей хэйловских циклов, чем все остальные, кроме единичных рядов DAI. Выявляется также, что средние, основанные на использовании фильтра № 1, лучше коррелируют, чем таковые с фильтром № 2, с огибающей кривой солнечных пятен, а уровни значимости корреляции достигают значений между 1 и 2 % и около 5 % соответственно.

«Взвешенные средние», включающие все пределы PDSI, основанные на применении каждого из двух фильтров в зависимости от времени, показаны на рис. 6 вместе с огибающей хэйловских циклов начиная с 1600 г. Некоторые интересные заключения можно сделать, рассматривая рис. 6. Во-первых,

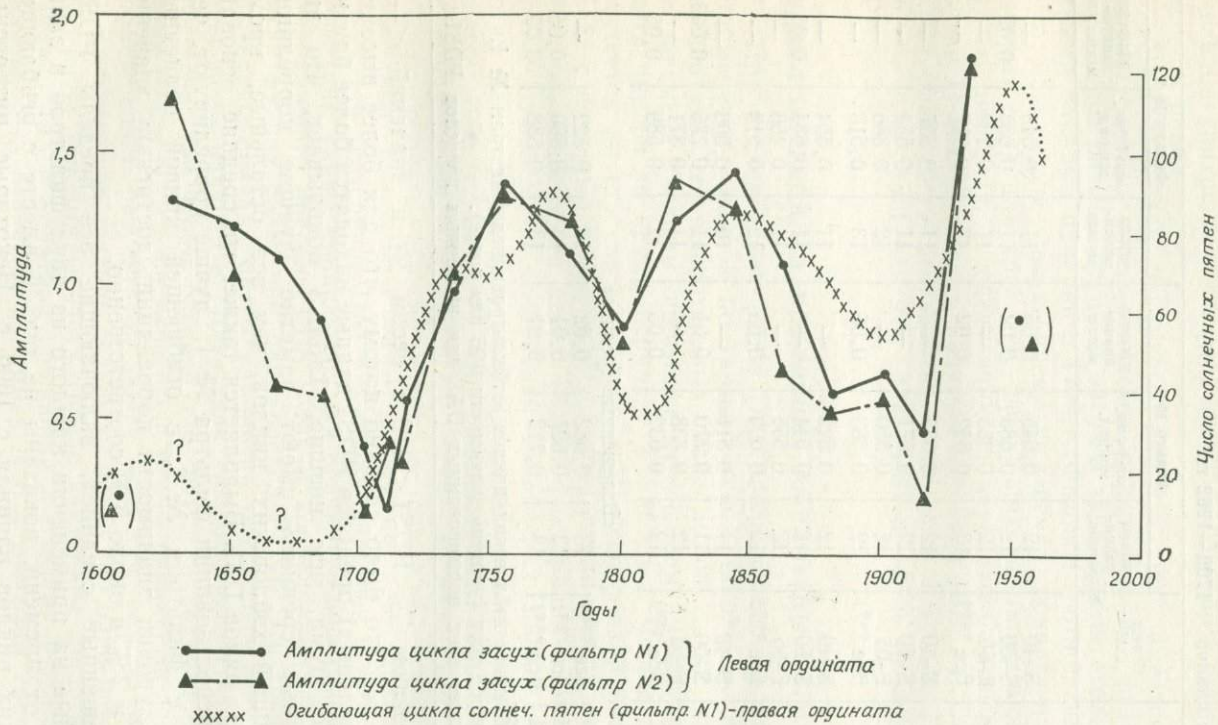


Рис. 6. Вариации амплитуды 22-летнего ритма засух в течение 1600—1962 г. (средние из всех рядов DA1), полученные при применении каждого из полосовых фильтров, и изменение во времени огибающей хэйловских циклов (см. приложение). Примерные данные по солнечным пятнам для периодов с 1600 по 1700 г. восстановлены Дж. Эдди.

можно видеть тенденцию в наступлении эпох циклов засух с большой амплитудой с опережением относительно солнечных циклов с большой амплитудой на 10 или 20 лет. Подобный сдвиг может также существовать между эпохами циклов и с низкими амплитудами у обоих переменных, но это менее ясно.

Интересно также, что амплитуда 22-летнего ритма засух была довольно большой в начале минимума Маундера, но она уменьшилась до очень низкого значения вблизи конца этого минимума (около 1700 г.) Амплитуда ритма засух стала почти такой же низкой снова около 1900 г. Амплитуда засухи в Даст Буоле в 1930 г. выступает в этом анализе, вероятно, как наиболее широко известный случай засухи, а также как наиболее экстремальный случай по пальмеровской шкале суровости засух, которые появлялись в западных штатах начиная с 1600 г. Это может или не может иметь значение в связи с тем, что тридцатые годы находились внутри 20 лет, когда были отмечены наивысшие числа солнечных пятен.

Итак, имеется предположение о долгопериодной модуляции величины максимумов засух в западных штатах во временном масштабе долгопериодных изменений амплитуд хэйловского цикла. Более конкретно амплитуда 22-летнего ритма площади, захваченной засухой в США, по-видимому, соответствует амплитуде хэйловского солнечного цикла, точнее говоря, с опережением его на часть цикла. Статистическая значимость этой долгопериодной связи лежит в диапазоне от 5 до 1 %.

6. ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ СРЕДНЕЙ ВЕЛИЧИНЫ ПЛОЩАДИ, ЗАХВАЧЕННОЙ ЗАСУХОЙ, НАЧИНАЯ С 1600 Г.

Кроме 22-летнего ритма изменений засух, на который в этой статье обращено особое внимание, весьма интересно исследовать долгопериодные изменения средней величины площади, захваченной засухой для периодов более 22 лет. Ряды DAI, описанные в разд. 1, здесь рассматриваются с этой точки зрения с использованием специального фильтра низких частот, который сглаживает 22-летний ритм и выявляет более медленные изменения. Предварительные данные, основанные на долгопериодных скользящих величинах, показывают, что минимум Маундера совпадает с продолжительным периодом относительно малых размеров площади засух, но другие более короткие периоды аналогичных малых размеров площади засух имели место в более поздние периоды включая 1900 г. Мы должны более тщательно изучить банк данных по годичным кольцам деревьев, чтобы проверить степень достоверности таких выводов, поскольку проблема коррекции по возрасту

деревьев, которая оказывает влияние на индексы колец деревьев, может стать потенциально важным источником ошибки в реконструкции средних климатических условий (отличных от 22-летних вариаций климата), отстоящих так далеко от нас, как XVII в.

7. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В этой статье мы суммировали результаты трех основных видов, подтверждающих мысль, что распространение засух в двух третях государства варьирует с той же самой 22-летней временной шкалой, как и хорошо известный магнитный цикл Хэйла на Солнце. Уровни статистической значимости, полученные в наших результатах, по-видимому, указывают, что статистическая связь между изменениями площади, захваченной засухой, и хэйловским циклом установлена с достаточной уверенностью и подтверждает серьезность постановки вопроса о возможных причинных механизмах. Поскольку до сих пор было признано, что знания множества высказанных утверждений о солнечно-климатических связях все еще недостаточны, мы не выражаем абсолютной уверенности в своих данных и, естественно, были бы рады получить подтверждение (или опровержение) нашим выводам путем любой обоснованной независимой проверки. В любом случае добавочные детали относительно нашей обработки данных и аналитических методов скоро появятся в специальной научной литературе для внимательного изучения. Естественно, возникают вопросы, как другие климатические изменения или другие районы мира могут быть использованы при изучении солнечно-климатических связей, рассмотренных здесь. Будем надеяться, что в будущем удастся получить достаточно длинные ряды новых данных (с помощью совершенных палеоклиматических методов), которые позволят раскрыть их природу. В настоящее время мы не можем быть целиком уверены в том, какие результаты реально можно получить и за какой период времени, чтобы исследовать подобную проблему. К сожалению, не во всех районах мира предоставляется возможность обращаться с дендро-климатическими данными для реконструкции климатов прошлого с адекватным временным разрешением и адекватным контролем временных привязок для исследования явлений, описанных здесь.

С точки зрения солнечной физики и солнечно-земных механизмов, возможно относящихся к изменению климата, наши выводы подразумевают влияние солнечной магнитной активности, приводящее к широкому распространению засух в западных штатах. Нам кажется, что солнечный контроль засух не следует

истолковывать как первичную движущую силу засух или климатических отклонений, в результате чего наступает засуха. Скорее мы предполагаем, что солнечный контроль присут-

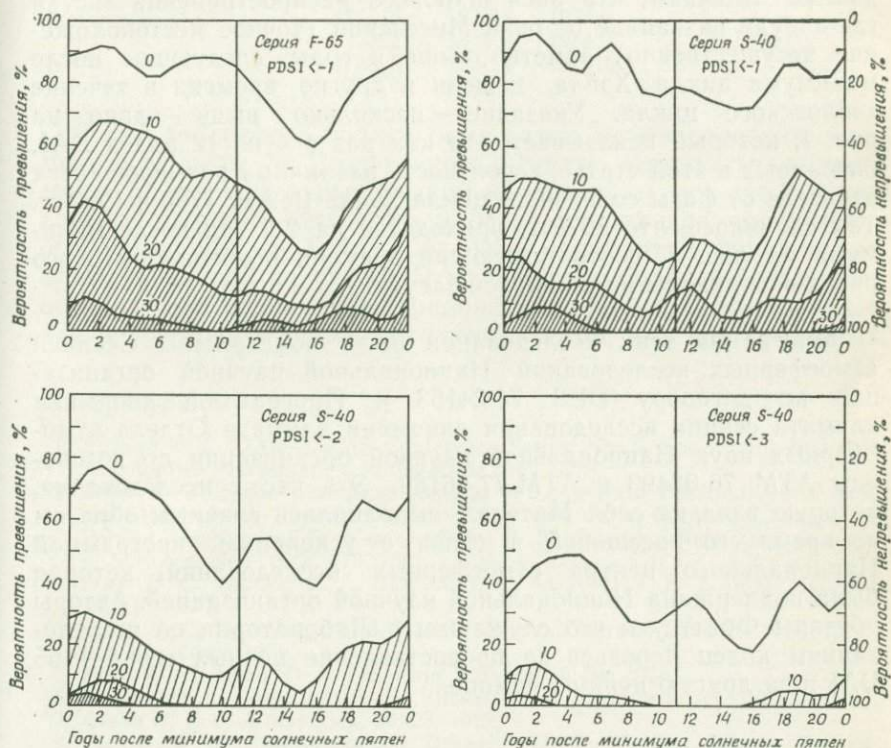


Рис. 7. Изменение вероятности того, что площади, захваченные засухами, превысят определенное число (числа на кривых указывают число районов из общего числа 40) в зависимости от фазы хэйловских циклов (приведенные к их средней длительности около 22 лет). Результаты получены по данным за период 1700—1962 г. для каждого из четырех рядов DAI. Все кривые сглажены как функции времени биномиальным скользящим средним с весами 1—4—6—4—1, всего 16.

ствует в природе модулирующего механизма, который выборочно поддерживает или препятствует распространению засухи в периоды, когда земные климатические изменения, не связанные с солнечными событиями, приводят к такому состоянию, которое реализуется в засуху. В любом случае необходимо подчеркнуть, что связь между засухой и поведением Солнца, описанная в этой работе, едва ли приведена здесь как надежное основание для оперативных климатических прогнозов. Наши данные полностью поясняют те случаи, при которых дождливый

год может наступить в то время, когда Солнце «говорит», что следует ожидать засухи, и, наоборот, что сильная засуха может развиться, когда Солнце «говорит» — засухи не будет. Наши данные означают, что риск широкого распространения засухи где-нибудь на западе от реки Миссисипи (точное местоположение несущественно) заметно выше в годы, следующие после минимума цикла Хэйла, нежели в другие времена в течение хэйловского цикла. Указание — насколько выше — дано на рис. 7, который показывает, что как раз в 4 из 12 рядов DAI, описанных в этой статье, вероятность различных размеров засух зависела от фазы солнечного цикла Хэйла между 1700 и 1962 гг. Так случилось, что 1978 г. приходится на 2-й год после минимума на рис. 7, соответствующий времени особенно высокого риска возникновения обширной засухи.

Многие из этих исследований были поддержаны Секцией атмосферных исследований Национальной научной организации по договору DES 74-24163 и Программой динамики климата секции исследования динамики климата Отдела атмосферных наук Национальной научной организации по договорам ATM 76-08493 и ATM-77-26189. Эта часть исследования, которую взял на себя Митчелл, выполнялась главным образом во время его посещений в связи с ускоренной программой Национального центра атмосферных исследований, которая была поддержана Национальной научной организацией. Авторы обязаны Фриттсу и его служащим в Лаборатории по исследованиям колец деревьев за предоставление ценных серий F-65 DAI и за дружную ценную помощь.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПОЛУЧЕНИЕ ДАТ МИНИМУМОВ ЦИКЛА ХЭЙЛА И ОГИБАЮЩЕЙ ЧИСЕЛ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Для этой статьи солнечные циклы Хэйла определены с помощью Цюрихских относительных чисел солнечных пятен, с чередованием четных 11-летних циклов, рассматриваемых как положительные, и промежуточных нечетных 11-летних циклов, рассматриваемых как отрицательные числа. Ряды средних годовых чисел солнечных пятен, определенных таким способом, были затем подвергнуты анализу в двух отношениях. Там, где знак числа пятен изменялся от положительного к отрицательному, пересечение с нулем рассматривалось как конец цикла Хэйла и начало следующего. В результате был составлен сле-

дующий список минимумов циклов Хэйла, использованных при анализе по гармонической шкале, о чем говорилось в разд. 4:

(1694,0)	1798,4	1913
1711,5	1823,4	1933,4
1733,2	1843,4	1954,1
1755,5	1867,2	1976,8
1775,3	1889,4	

Ряды хэйловских циклов были затем профильтрованы с помощью фильтра № 1, описанного в тексте. Максимумы и минимумы (с положительным знаком изменений) этого профильтрованного варианта рядов были использованы для определения огибающей циклов Хэйла в качестве сглаженной функции времени, указанной на рис. 6. Это привело к более определенным оценкам долгопериодных вариаций амплитуд солнечного цикла, чем использование сумм абсолютных пятен или других данных.

Литература

1. *Blasing T. J.* SIAM—SIMS Conference Series, No. 5, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 211, 1978.
2. *Brier G. W.* Some Statistical Aspects of Long-Term Fluctuations in Solar and Atmospheric Phenomena, in: *Solar Variations, Climatic Change, and Related Geophysical Problems*, ed. by F. N. Furness, New York Academy of Sciences, New York, 173, 1961.
3. *Fritts H. C., Blasing T. J., Hayden B. P., Kutzbach J. E.* *J. Appl. Meteorol.*, **10**, 845, 1971.
4. *Fritts H. C.* *Tree Rings and Climate*, Academic Press, London—New York—San Francisco, 1976.
5. *Fritts H. C., Shatz D. J.* *Tree-Ring Bulletin*, **35**, 31, 1975.
6. *Gilman D. L., Fuglister F. J., Mitchell J. M.* *J. Atmos. Sci.*, **20**, 182, 1963.
7. *Glahn H. R.* *J. Atmos. Sci.*, **25**, 23, 1968.
8. *Palmer W. C.* *Meteorological Drought*, U. S. Weather Bureau Research Paper No. 45, Washington, D. C., 1965.
9. *Stockton C. W., Meko D. M.* *Weatherwise*, **28**, 244, 1975.
10. *Stockton C. W.* *Long Term Streamflow Records Reconstructed from Tree Rings*, Pap. Lab. Tree-Ring Res. No. 5, Univ. Arizona Press, Tucson, 1975.

СВОБОДНАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ И ЕЕ СВЯЗЬ С СОЛНЕЧНО-ПОГОДНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

М. Ф. Ларсен, М. С. Келли

Мы вычислили свободную потенциальную энергию в средней атмосфере и сравнили ее с энергией, необходимой для объяснения солнечно-погодных явлений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Область солнечно-погодной физики исторически развивалась как ряд исследований, в которых указывалось, что тропосферные явления могут рассматриваться как результат солнечного возмущения. Недоверие основной массы научной общественности к этим результатам было обусловлено принятым в этой теории энергетическим подходом и отсутствием ясных физических механизмов, которые могли бы быть использованы для проверки теории. Как может солнечный «сигнал» воздействовать на тропосферную циркуляцию, когда плотность энергии последней на несколько порядков выше, чем у солнечного «сигнала»? Совсем недавно были предложены механизмы, основанные на различных триггерных эффектах, в которых солнечный «сигнал» только запускает источник энергии, имеющийся в атмосфере. Необходимо, однако, оценить эти управляемые источники энергии, чтобы определить, способны ли они обеспечить необходимой энергией статистически обоснованные солнечно-погодные явления, и какой из предложенных механизмов является наиболее перспективным.

Существуют по крайней мере три основных механизма, предложенных на сегодняшний день, которые подлежат проверке:

1) возможные воздействия Солнца на распространения планетарных волн в виде приливно-отливного движения или в виде отражения волн Россби в средней атмосфере;

2) эффект модуляции атмосферного электрического поля под влиянием солнечной активности на конденсацию водяных паров в тропосфере и

3) возможные эффекты разогрева, обусловленные освобож-

M. F. Larsen. Atmospheric Sciences Department and School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca NY 14853 USA.

M. C. Kelley. School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca NY 14853 USA.

дением запасенной химической энергии при вариациях стратосферного озона, связанных с солнечной активностью.

Мы предлагаем включить в этот список еще один, четвертый механизм и проведем для него необходимые энергетические расчеты.

2. ОПИСАНИЕ И ПРОВЕРКА МЕХАНИЗМА

Механизм включает образование нейтральных атмосферных волн в верхней и средней атмосфере с направленной вниз компонентой групповой скорости. Хотя амплитуда нейтральных атмосферных волн изменяется с высотой как $\exp(z/2H)$, где H — высота однородной атмосферы (~ 8 км), а z — высота, это экспоненциальное уменьшение амплитуды волны с уменьшением высоты можно было бы частично скомпенсировать, если бы эти волны были способны захватывать часть свободной энергии, всегда присутствующей в средней атмосфере. Источником волн может, например, явиться дрейф ионов, джоулево тепло, разогрев частиц в авроральной зоне или вариации озона в средней атмосфере. Наиболее важный вопрос, на который следует ответить, — имеется ли нет достаточное количество свободной энергии в средней атмосфере, чтобы вызвать соответствующие циркуляции в тропосфере.

Свободная энергия существует в атмосфере, когда не совпадают поверхности постоянной плотности и давления. Поскольку плотность непосредственно не измеряется на сети станций, то это несовпадение может быть обнаружено по наличию горизонтального градиента температуры. В глобальном масштабе этот градиент возникает вследствие разности нагрева между полюсами и экватором. В действительности этот источник свободной энергии является движущей силой образования погоды в тропосфере, которая может рассматриваться как следствие неустойчивости в зональных потоках. Этот же источник энергии может быть также связан со свободной энергией в среде с ветровым сдвигом, так как для потока в геострофическом приближении горизонтальный градиент температуры неизбежно вызывает вертикальный сдвиг ветра [2]. Возникает вопрос, какова точная величина свободной энергии, которая может быть извлечена из средней атмосферы.

Чтобы ответить на этот вопрос, мы используем результаты, приведенные в работе [1], где автор нашел, что свободная потенциальная энергия (СПЭ) в атмосфере связана с изменением температуры на поверхности постоянного давления. В частности, СПЭ определяется интегралом по вертикальному столбу от следующего выражения:

$$\frac{1}{2} \bar{T} (\Gamma_d - \bar{\Gamma})^{-1} (\overline{T'/\bar{T}})^2 dp.$$

Здесь \bar{T} — средняя температура в слое, p — давление, T' — локальное отклонение температуры, Γ_d — сухоадиабатический градиент понижения температуры с высотой и $\bar{\Gamma}$ — среднее значение градиента в слое. Чтобы оценить интеграл, мы использовали значения всех величин по модели CIRA (1972) для широты 60—70° за январь месяц. Интегрируя по высоте в области 10—90 км, мы нашли, что энергия на единицу площади в столбе равна $2,8 \cdot 10^5$ Дж/м². Если предположить, что генерируемая волна имеет широтную и меридиональную длину около $2 \cdot 10^3$ км, то энергия, доступная волне, распространяющейся в средней атмосфере, равна $11,2 \cdot 10^{17}$ Дж. По различным, не вполне ясным причинам в тропосфере обычно только 10 % свободной потенциальной энергии проявляется в виде коротких волн, которые ответственны за структурные образования с самыми низкими и самыми высокими уровнями давления на средних широтах. Используя это соотношение, находим, что волнами извлекается энергия порядка $1,12 \cdot 10^{17}$ Дж. Это сопоставимо с полученным Уиллисом [3] значением 10^{17} , необходимым для обеспечения солнечно-погодных связей.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКИ МЕХАНИЗМА

В свете проведенных энергетических оценок имеет смысл рассматривать проблему солнечно-атмосферных связей с энергетической точки зрения. Понимание того, как волны перераспределяют энергию в потоке с ветровым сдвигом, представляет интерес не только для солнечно-атмосферной физики, но и для изучения динамики средней и верхней атмосферы. Мы прорабатываем эти вопросы с точки зрения теории неустойчивости начиная с теории распространения гравитационных волн в среде с вертикальным и горизонтальным ветровыми сдвигами. Эта работа выглядит очень перспективной, но сегодня она еще не завершена.

Эти исследования поддерживались отделом атмосферных исследований Национального научного управления по договору ATM-77-04518.

Литература

1. Lorenz E. N. Energy and Numerical Weather Predictions. *Tellus*, 12, 364, 1960.
2. Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press, New York, 1972.
3. Willis D. M. The Energetics of Sun-Weather Relationships—Magnetospheric Processes. *J. Atmos. Ter. Phys.*, 38, 685, 1976.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА НА ЦИРКУЛЯЦИЮ ТРОПОСФЕРЫ

Дж. М. Уилкоккс

Основой для формирования секторной структуры межпланетного магнитного поля (ММП) является крупномасштабная структура магнитного поля атмосферы Солнца, которое выносится солнечным ветром, в результате чего образуется гофрированный токовый слой в гелиосфере. Полный 27-суточный оборот этого токового слоя, проносимого солнечным ветром мимо Земли, проявляется в ряде земных эффектов. Площадь тропосферных ложбин в зимний сезон в северном полушарии, измеренная с помощью индекса завихренности атмосферы VAI, достигает минимума примерно сутки спустя после того, как токовый слой пересекает с Землей (граница сектора). Величина этого минимума в процентном отношении больше для областей с наиболее интенсивной тропосферной циркуляцией. Отдельные прохождения токового слоя, наблюдаемые в межпланетной среде, могут оказать значительное влияние на площадь ложбин, которая в ряде случаев может быть вдвое больше по сравнению со средним эффектом. Количественный анализ показывает, что прогнозы погоды для ограниченной области с плотной метеосетью существенно менее точны в течение двух дней после прохождения границы сектора. Отдельные ложбины, пересекающие долготу 180°W , оказываются заметно больше, когда ММП направлено от Солнца (т. е. когда токовый слой расположен южнее Земли), чем ложбины, пересекающие эту долготу, когда поле направлено к Солнцу. Возможные физические механизмы включают влияние солнечной активности на планетарные волны, приводящие к их развитию или затуханию, влияние токового слоя на вертикальное электрическое поле в тропосфере, а также связанные с секторной структурой изменения интенсивности солнечного крайнего ультрафиолетового излучения, которые могут оказывать влияние на концентрацию озона и скорость химических процессов в атмосфере.

Крупномасштабное ММП в гелиосфере может быть представлено как следствие существования электрического токового слоя, имеющего искривления на север и на юг от солнечного экватора, как показано на рис. 1 [9]. Источником этого токо-

вого слоя является наблюдаемая структура фотосферного магнитного поля [10], поэтому токовый слой делает полный оборот, проходя мимо Земли, за период вращения Солнца в 27 сут. Гофрированная структура слоя обычно довольно



Рис. 1. Картина гофрированного гелиосферного токового слоя, связанная с солнечным источником метеорологических эффектов, описанных в этом обзоре.

устойчива от одного оборота к другому, но заметна его эволюция, так что спектральная плотность напряженности ММП имеет размытый максимум, вблизи периода 27 сут. Отсутствие строгой периодичности в ММП помогает уменьшить возможность случайного совпадения 27-суточной периодичности солнечных и метеорологических явлений.

В настоящее время установлено, что в области геоиосферы севернее токового слоя существует ММП, направленное от Солнца, в то время как область южнее токового слоя имеет ММП, направленное к Солнцу. Полярности изменяются каждые 11 лет, приблизительно 2 года спустя после максимума 11-летнего цикла [13].

В описываемых солнечно-атмосферных исследованиях момент времени, когда наблюдается пересечение гофрированного токового слоя с Землей, дает фазовую информацию или нуле-

вой день на рис. 2. Кажется маловероятным, что такой токовый слой сам по себе дает заметный земной эффект, но он предоставляет возможность для удобного и точного отсчета времени. Предположительные физические причины могут быть обусловлены другими факторами, связанными с секторной структурой (расположением токового слоя) [14].

Можно отметить некоторые преимущества в использовании гелиосферного токового слоя в солнечно-атмосферных исследованиях:

1) Не вызывает сомнения солнечная природа явления, время прихода которого к Земле можно точно наблюдать.

2) Эта четко определенная физическая структура связана с наблюдаемыми магнитными полями на Солнце. Она гораздо более точно описывает активность Солнца, чем число солнечных пятен.

3) Несколько исследовательских групп опубликовали ряд солнечно-атмосферных работ, где используется гелиосферный токовый слой (т. е. время прохождения границы сектора).

Новые исследования можно легко сопоставить с прежними и привести в соответствие с теми закономерностями, которые установлены предыдущими исследователями. Эта ситуация выглядит лучше по сравнению с положением остальной литературы по солнечно-атмосферным исследованиям, где содержится немало изолированных фрагментарных утверждений, которые трудно оценить или сопоставить. Атлас дат прохождения границ секторов опубликован [11].

4) Прохождение отдельных границ секторов (см. ниже), при которых наблюдаются особенно активные явления, приводит к большему влиянию на области низкого давления; можно также предположить, что эти эффекты могут иметь наибольшую амплитуду среди других солнечно-атмосферных эффектов.

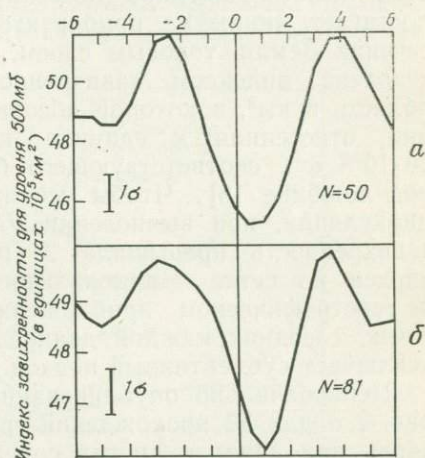


Рис. 2. Изменение в VAI, вычисленное для северного полушария, когда гелиосферный токовый слой, показанный на рис. 1, пронесется мимо Земли солнечным ветром. Ордината — приближенная оценка площади примерно 12 ложбин, присутствующих обычно в северном полушарии. Нулевой день соответствует времени пересечения токового слоя с Землей. а — на основе 50 ранее исследованных случаев, б — на основе 81-го нового случая.

Предложение использовать в солнечно-атмосферных исследованиях структуру солнечного и межпланетного магнитного поля было впервые сделано Марксоном [4]. Несколькими годами позже Уилкокс и др. [15] получили результаты, представленные на рис. 2, которые показывают, что площадь областей низкого давления (ложбин) зимой в северном полушарии достигает минимума приблизительно 1 сут спустя после пересечения Земли токовым слоем. Площадь ложбин была представлена индексом завихренности VAI, определенным как область в км², в которой абсолютная завихренность (циркуляция, отнесенная к единице площади) достигает значения $20 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, соответствующего большой хорошо сформированной ложбине [8]. Чтобы усилить влияние крупномасштабной циркуляции, при вычислении VAI прибавлялась площадь, где завихренность превышала $24 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Индекс VAI был вычислен по сетке Национального метеорологического центра в геострофическом приближении с использованием четырех точек, соседних каждой данной точке сетки. Это вычисление исключает субъективный подход.

Первоначально опубликованные результаты, показанные на рис. 2, а для 50 прохождений границ секторов, были получены вновь при анализе других случаев (81) прохождения границ, как показано на рис. 2, б. Важное исследование значимости результатов, представленных на рис. 2, было сделано Хайнсом и Гэлеви [2], которые проанализировали случаи, когда эффект мог бы быть получен за счет различных характеристик данных, таких, как долгопериодные тренды и другие регулярности в рядах. Они пришли к заключению об обоснованности результатов, показанных на рис. 2, и необходимости искать их физическое объяснение.

Мы затем покажем, что величина минимума на рис. 2 в процентном отношении больше для областей в тропосфере, характеризующихся более интенсивной циркуляцией. Рис. 3 показывает результаты исследования, в котором были выполнены вычисления, аналогичные показанным на рис. 2, за исключением того, что величина завихренности, используемая при вычислении VAI, была параметром, а северное полушарие было разделено на 8 широтных зон, так что каждая зона имела приблизительно то же количество точек по октагональной сетке Национального метеорологического центра. Если мы сконцентрируем внимание на широтной зоне 43—51°, внутри которой циркулирует большая часть ложбин, то мы увидим монотонное увеличение глубины минимума VAI с увеличением завихренности. Подобный тренд найден и для других широтных зон.

Швестка и др. [12] обратили внимание, что прохождение некоторых границ секторов сопровождается потоком протонов

с энергией несколько МэВ, который наблюдается в течение нескольких дней. Рис. 4 показывает результаты анализа, подобного представленному на рис. 2, изменения среднего по северному полушарию значения VAI в зависимости от времени прохождения границ секторов. Сплошная линия представляет 18 границ, за которыми следовали потоки протонов, как показано в [12], в то время как пунктирная линия представляет

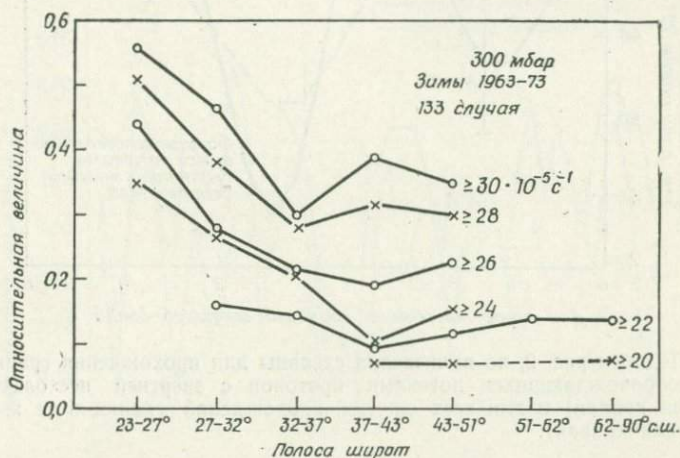


Рис. 3. Относительная величина минимума VAI, связанная с секторной структурой, как функция широты и значений завихренности, использованных при вычислении индекса.

60 других прохождений границ в течение тех же зим (1963—1969 г.). Можно отметить, что минимум VAI, связанный с границами, за которыми следовали потоки протонов, почти в два раза глубже, чем минимум, связанный с обычными границами.

Несомненно, что существование протонов с энергиями в несколько МэВ способствует усилению метеорологической реакции, показанной на рис. 4. Найдено, что сектора, содержащие протонные потоки, почти во всех случаях должны быть более активны. Например, сплошная линия на рис. 5 показывает, что границы с протонными потоками сопровождалось большим увеличением напряженности межпланетного магнитного поля, тогда как обычные границы в те же зимы не показывают изменения в величине поля. Подобный результат найден и для геомагнитной активности по отношению к двум классам секторных границ. Эти новые результаты могут оказаться полезными для определения неуловимых физических механизмов солнечно-атмосферных эффектов. Усиление метеоэффекта, свя-

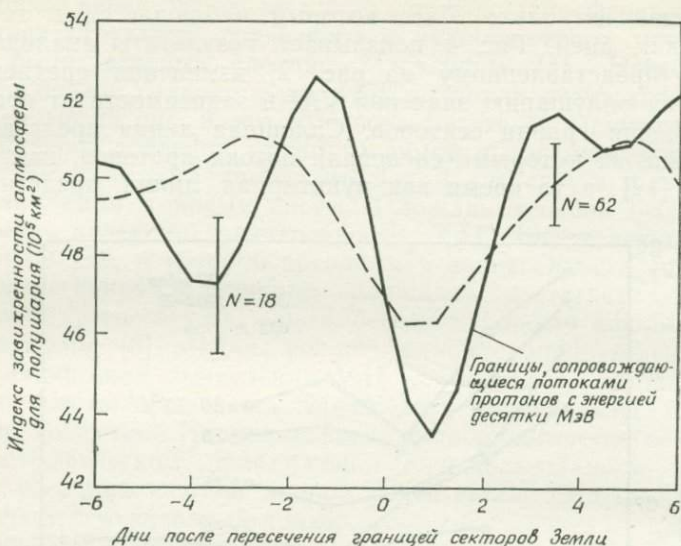


Рис. 4. Подобен рис. 2, но вычисления сделаны для прохождения границ секторов, сопровождающихся потоками протонов с энергией несколько МэВ (сплошная кривая) и для всех других прохождений границ в те же зимы (пунктирная кривая).

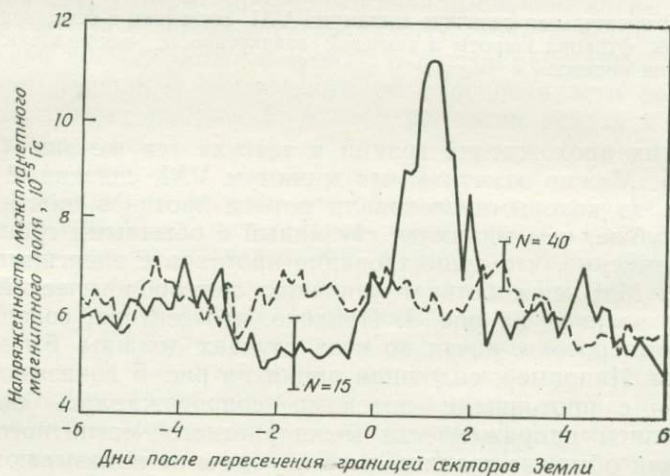


Рис. 5. Вариация напряженности межпланетного магнитного поля после прохождения границы секторов с потоками протонов с энергией несколько МэВ (сплошная кривая) в сравнении с прохождением других границ в те же зимы (пунктирная кривая).

занного с прохождением границ с протонными потоками, следует поискать и для других исследованных метеорологических явлений, связанных с секторной структурой.

В анализе, проведенном Ларсеном и Келли [3], использована недавно установленная ограниченная область с плотной метеосетью над континентальными штатами. Авторы получили

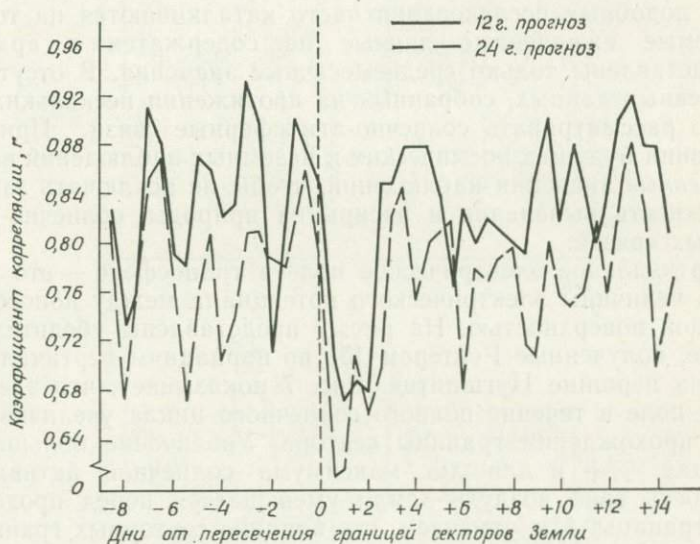


Рис. 6. Анализ точности прогноза тропосферной завихренности в зависимости от времени пересечения с Землей гофрированного токового слоя. Ордината — коэффициент корреляции между спрогнозированными и наблюдаемыми индексами. В течение первых двух дней после прохождения токового слоя коэффициент корреляции систематически ниже примерно на 0,15 [3].

результаты, аналогичные показанным на рис. 2. Наиболее интересный результат — проведение количественного анализа точности прогнозов погоды в системе отсчета времени, отнесенной к солнечной и межпланетной секторной структуре. На рис. 6 по оси абсцисс нанесено время (сут), прошедшее после пересечения Земли гофрированным токовым слоем, а по оси ординат — измеренная точность предсказания погоды, сделанного в определенные периоды времени (детали этих расчетов см. в [3]). Мы видим на рис. 6, что точность прогнозов погоды заметно уменьшается в течение двух дней, следующих за прохождением границы сектора. Поддающиеся оценке уменьшение точности прогнозов погоды вблизи времени прохождения секторной границы позволяет предположить, что влияние солнечной актив-

ности может иметь значимое и важное воздействие на точность прогнозов погоды, несмотря на пока неуловимую природу солнечно-атмосферных эффектов.

Уместно отметить, что работа Ларсена и Келли [3] была выполнена благодаря тому, что они получили доступ к ежедневным данным, собранным в архиве отдела атмосферных исследований Пенсильванского университета. Попытки проведения подобных исследований часто наталкиваются на то, что требуемые ежедневные данные не содержатся в архивах, а представлены только среднемесячные значения. В отсутствие ежедневных данных, собранных на протяжении нескольких лет, трудно рассматривать солнечно-атмосферные связи. При планировании будущих космических и наземных наблюдений важны *ежедневные* значения наблюдений, чтобы не исключать заранее возможность выявления и раскрытия природы солнечно-атмосферных связей.

Вертикальное электрическое поле в тропосфере — это показатель величины электрического потенциала между ионосферой и земной поверхностью. На рис. 7 представлены убедительные данные, полученные Рейтером [5] по вариациям вертикального поля на вершине Цугшпитце. Рис. 7 показывает, что электрическое поле в течение полного солнечного цикла увеличивается после прохождения границы сектора. Увеличение больше при границах $-/+$ и для лет максимума солнечной активности. Плотность тока воздух—Земля уменьшается перед прохождением границы. Мы отмечаем, что влияние секторных границ на VAI также имеет тенденцию к увеличению для лет максимума солнечной активности.

Парк [8] нашел, что вертикальное электрическое поле, наблюдаемое вблизи южного геомагнитного полюса на советской станции Восток, характеризуется минимумом спустя несколько дней после прохождения границы секторов. Для местной зимы отмечается большая амплитуда эффекта, чем для местного лета. Пока неясно, почему минимум был обнаружен на станции Восток и максимум на Цугшпитце. Дальнейшие исследования в различных точках во всем мире будут способствовать выяснению этого вопроса. Во всяком случае правдоподобно, что изменения в атмосферном электрическом поле могут оказаться важными для метеорологических процессов, например для процессов образования облаков [4]. Изменение количества облаков типа *cirrus* может иметь важное влияние на бюджет атмосферного тепла, как это было рассмотрено Робертсом и Олсоном [7].

Важный ключ к пониманию изменений в атмосферной циркуляции, связанных с секторной структурой, содержится в результатах Рейтера и Литтфаса [6], представленных на рис. 8.

Этот рисунок показывает изменения концентрации ^{7}Be и O_3 , измеренные на Цугшпитце, в зависимости от секторной структуры. ^{7}Be преимущественно образуется в стратосфере при воздействии космических лучей на атмосферный N_2 . Увеличение

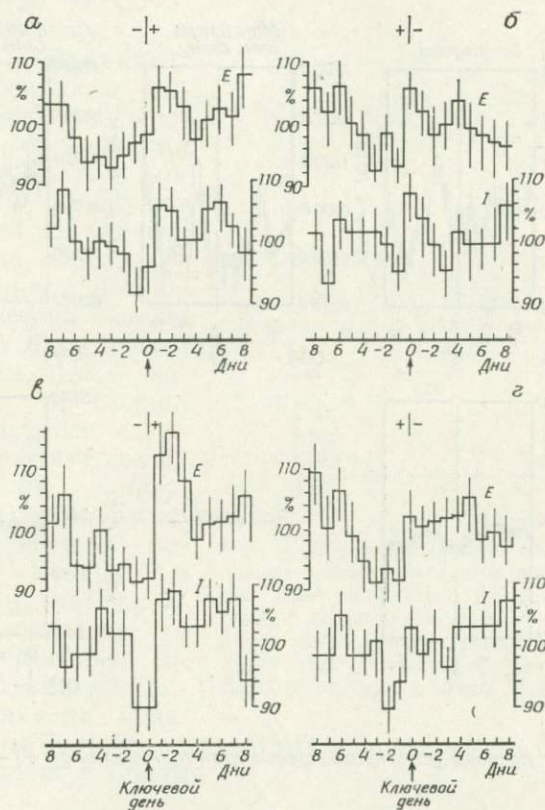


Рис. 7. Анализ с помощью метода наложенных эпох атмосферного электрического поля E и плотности тока I воздух—Земля, измеренных на горной обсерватории Цугшпитце вблизи времени прохождения границы секторов [5].

концентрации ^{7}Be , замеченное на вершине высотой 3 км, указывает на приток стратосферного воздуха в нижнюю тропосферу. Рис. 8 показывает, что такие притоки имеют тенденцию появляться несколько дней спустя после прохождения границы сектора. Эффект наблюдается для обоих типов границ (+/- и -/+), но с наибольшей амплитудой для границ +/- . В теоретических расчетах, связывающих химию атмосферы с солнечной активностью, следует принимать во внимание такую цир-

5. *Reiter R. J.* Atmos. Terr. Phys., **39**, 95, 1977.
6. *Reiter R., Littfass M.* Arch. Met. Geophys. Biokl., Ser. A, **26**, 12, 1977.
7. *Roberts W. O., Olson R.* Rev. Geophys. Space Phys., **11**, 731, 1973.
8. *Park C. C.* Geophys. Res. Lett., **3**, 475, 1976.
9. *Svalgaard L., Wilcox J. M.* Nature, **262**, 766, 1976.
10. *Svalgaard L., Wilcox J. M., Scherrer P. H., Howard R.* Solar Physics, **45**, 83, 1975.
11. *Svalgaard L.* Stanford University Institute for Plasma Research Report No. 629, An Atlas of Interplanetary Sector Structure 1957—1974, 1975 and Report No. 648, Interplanetary Sector Structure 1947—1975, 1976.
12. *Svestka Z., Fritzoova-Svestkova J. T., Dodson-Prince H. W., Hedeman E. R.* Solar Phys., **50**, 491, 1976.
13. *Wilcox J. M., Scherrer P. H.* J. Geophys. Res., **77**, 5385, 1972.
14. *Wilcox J. M.* Space Sci. Rev., **8**, 258, 1968.
15. *Wilcox J. M., Scherrer P. H., Svalgaard L., Roberts W. O., Olson R., Jenne R. L.* J. Atmos. Sci., **31**, 581, 1974; *Wilcox J. M., Svalgaard L., Scherrer P. H.* J. Atmos. Sci., **33**, 1113, 1976.
16. *Yeager D. M., Frank L. A.* J. Geophys. Res., **81**, 3966, 1976.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОИСКИ ПРИЧИННЫХ МЕХАНИЗМОВ СВЯЗИ ПОГОДЫ И КЛИМАТА С СОЛНЦЕМ

Р. А. Гольдберг

Стратосфера и нижняя мезосфера представляют собой области, где весьма возможно протекание процессов, осуществляющих связь между Солнцем и погодой. В представленном здесь подходе исследуется роль средней атмосферы как буферной области, т. е. той области, где подводимая извне энергия модулируется, фильтруется, усиливается и/или отражается. Представлена текущая программа экспериментов. Она предназначена для исследования отклика атмосферы на корпускулярные потоки в высоких широтах, тесно связанные с солнечной активностью. У многих связей Солнца и погоды замечена более высокая степень корреляции на высоких широтах и в течение локальной зимы, когда прямое воздействие солнечного излучения менее существенно. Это означает, что высокоширотная атмосфера должна быть первоочередным районом поиска причинных механизмов. В настоящее время для оценки отклика O_3 на выделение энергии в высоких широтах изучаются спутниковые данные («Нимбус IV» РУФ O_3). Кроме того, в Покер-Флэт, Аляска, проводились две сложные и хорошо скоординированные программы исследований на ракетах и аэростатах излучений большой энергии, проникающих до высот стратосферы, и их влияния на локальные электрические и неэлектрические характеристики атмосферы. Предварительные результаты указывают на неожиданное снижение концентрации O_3 в течение двух авроральных рентгеновских событий умеренной интенсивности, а также выявляют ионные эффекты, из которых могут следовать значительные изменения в локальной аэрономии. Обсуждаются также планы будущих продолжительных исследований, включающих исследования на станции «Спейслэб».

1. ВВЕДЕНИЕ

Точка зрения, что определенные характеристики погоды и поведение климата вызываются явлениями на Солнце, базируется в основном на статистическом материале. Он включает

R. A. Goldberg, Laboratory for Atmospheric Sciences, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771 USA.

в себя, например, изменчивость солнечной активности [1], прохождение границ солнечных магнитных полей [2, 3], единичные и двойные солнечные циклы [4, 5]. Чтобы понять эти статистические соотношения, мы должны определить действующие физические процессы и проследить связь между причиной и результатом. Для развития базы, на которой будет основана возможность предсказывать погоду и в особенности климат, существенно полное понимание физических и химических процессов, ответственных за наблюдаемые корреляции.

Рассмотрение энергетики соответствующих процессов [6, 7] показывает, что энергия (в первую очередь в виде корпускулярного излучения), поставляемая в земную атмосферу при отдельных событиях на Солнце, не может сравниться с полным излучением Солнца и недостаточна для поддержания типичной системы стратосферной бури. Несоразмерность между корпускулярным излучением и потоком светового излучения Солнца становится менее резкой, если представить себе, что экранирующее действие геомагнитного поля вынуждает основную часть корпускулярного излучения концентрироваться на высоких широтах, где эффекты солнечного излучения минимальны, особенно в условиях локальной зимы. Можно показать, что в отдельных местах на высоких широтах отношение потока корпускулярного излучения к потоку солнечного излучения может значительно увеличиваться [8]. Таким образом, неудивительно, что многие взаимосвязи между Солнцем и погодой лучше заметны на высоких широтах и наиболее явно выражены в зимний период.

Существует несколько видов излучений с большой энергией, достигающих различных высот на высоких широтах. Галактические космические лучи, поведение которых регулируется солнечной активностью, обычно определяют электрические свойства атмосферы между 5 и 30 км. Протонные события (ППШ) относительно редки, однако они могут увеличивать ионизацию на порядок величины вблизи высоты 30 км. Высыпания релятивистских электронов (ВРЭ) несут меньше энергии, но зато более часты и могут вызывать, например, в O_3 изменения, имеющие более устойчивый и кумулятивный характер [9]. Наконец, существуют очень часто повторяющиеся явления локальных высыпаний электронов в авроральной зоне; они часто порождают значительные рентгеновские потоки за счет тормозного излучения. Энергия электронов преобразуется в энергию рентгеновских фотонов, которые переносят энергию более глубоко в атмосферу, вызывая, таким образом, эффекты на высотах, значительно меньших, чем высота поглощения для исходных электронов.

В недавних наблюдениях стратосферного озона во время явлений вторжения частиц уже наметились некоторые возмож-

ные механизмы. Уикс и др. [10] и недавно Хит и др. [11] наблюдали уменьшение концентрации O_3 на высотах ниже 60 км во время протонных событий на Солнце. С другой стороны, Маеда и Хит [12] недавно сообщили о свидетельствах увеличения вблизи 50 км количества O_3 за счет тормозного рентгеновского излучения, сопровождающего диффузное полярное сияние. Предполагается, что флуктуации содержания O_3 воздействуют на погоду в стратосфере путем поглощения ультрафиолетового излучения и модуляции нагрева стратосферы, что в свою очередь вызывает изменения в картине циркуляции.

В этой статье дано описание и предварительные результаты текущей программы исследований отклика мезосферы и стратосферы на вышеупомянутые корпускулярные излучения, вызванные солнечной активностью. Для отображения корреляции между вариациями O_3 и явлениями выделения энергии в высоких широтах используются спутниковые данные. Уже выполнены две программы исследований на ракетах и аэростатах, ставившие целью измерение локальных изменений O_3 и электрических параметров одновременно с изучением распределения исходных электронов, порождающих рентгеновское излучение. Обсуждаются также планы построения при помощи станции «Спейслэб» глобальной картины выпадений электронов.

2. ПОДХОД И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗУЧЕНИЮ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (РУФ) НА СПУТНИКЕ «НИМБУС-IV»

В эксперименте РУФ на «Нимбусе-IV» используется сканирующий ультрафиолетовый (УФ) спектрометр, предназначенный для измерения рассеянного в обратном направлении атмосферой ультрафиолетового излучения Солнца. Производится наблюдение за 12 длинами волн, для каждого из этих излучений получается однозначная характеристика поглощения атмосферным озоном, являющаяся функцией как атмосферной толщи, так и концентрации O_3 . Таким образом возможно, используя комбинации различных длин волн и методы инверсии, отобразить изменения полного содержания O_3 и построить высотные профили его концентрации.

Хитом и др. [11] уже показано, что эта методика достаточно чувствительна для регистрации изменений в O_3 , вызванных явлениями ППШ. На рис. 1 приведен представленный ими отклик полного содержания атмосферного озона выше уровня 4 мбар для трех географических зон. Данные представляют собой средние за сутки и по зоне величины. Из рисунка ясно, что во время

явлений больших ППШ в августе 1972 г., начавшихся вблизи 217 сут (4 августа), на высоких широтах произошло значительное ($\sim 20\%$) снижение содержания O_3 , продолжавшееся еще

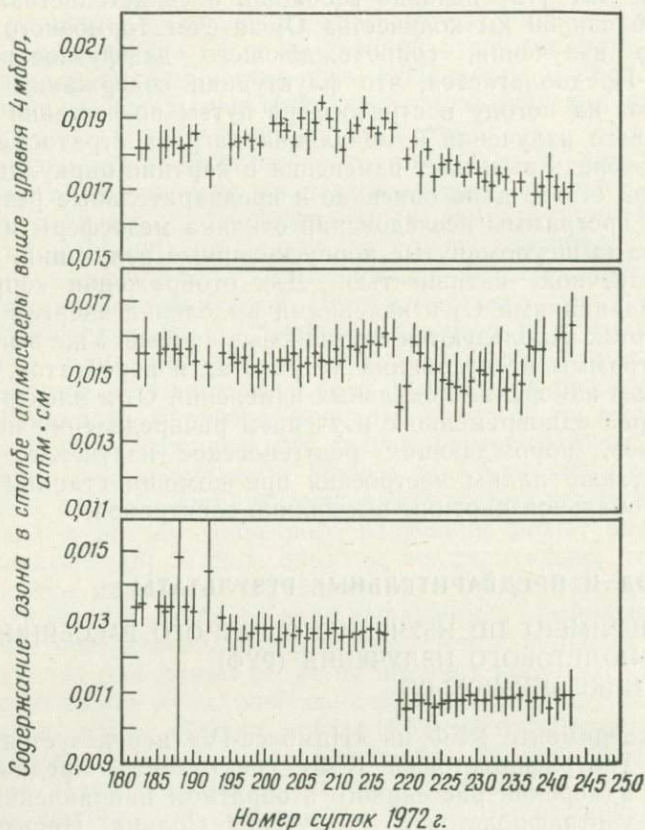


Рис. 1. Средние за сутки и по зоне содержания O_3 в единичном столбе атмосферы выше уровня 4 мбар для тропической, среднеширотной и высокоширотной зон в период за июль—август 1972 г. [11].

долгое время после окончания этих явлений. Эффект уменьшается в зоне от 55 до 65° с. ш. и не заметен в тропической зоне. Хит указал также (частное сообщение), что аналогичные эффекты, но с гораздо большими изменениями были видны в высоких широтах южного полушария в условиях локальной зимы. Эти результаты еще более удивительны, если вспомнить, что усреднение по географической зоне имеет тенденцию смазывать эффекты, вызванные корпускулярным излучением под контролем геомагнитного поля.

В настоящее время существует массив данных по РУФ за 7—8 лет, так что для восстановления информации об отклике озона на ППШ, ВРЭ и другие высокоширотные явления может быть применен мощный аппарат статистического анализа. Успешность использования этого массива данных существенно зависит от качества самих данных. В Центре космических полетов им. Годдарда специально для улучшения качества данных, полученных на «Нимбусе-IV», была сформирована группа обработки данных по озону (ГОДО) под руководством Флейга. В их исследовании было продемонстрировано существование фоновых эффектов, отчасти вызванных высыпавшимися энергичными частицами; фон мог искажать величины излучения, измеренные прибором. Это особенно существенно для высоких широт, где сначала следует провести надлежащую коррекцию на фон, а затем приписывать озону оставшиеся флуктуации.

В рамках программы ГОДО мы разработали (совместно со Стассинопулусом) систему математического обеспечения для анализа скорости счета от темновых токов в эксперименте РУФ на «Нимбусе-IV». Этот пакет программ позволяет проводить анализ пространственных и временных характеристик данных об РУФ для минимальных размеров исследуемых участков 3° по широте на 5° по долготе и для номеров прохождения над этими участками от 1 до N. Для любого набора данных может быть проведено усреднение и определена статистическая значимость. Кроме того, перечень пространственных координат включает в себя географические координаты, магнитные координаты, $B-L$ -координаты и магнитное время. Солнечные и геофизические условия определяются путем использования глобальных индексов, включая A_p , AE , D_{st} , прохождение солнечной секторной границы и поток на 10,7 см. Для сопоставления также представлены мгновенные или проинтегрированные по времени спектральные распределения частиц, захваченных в радиационные пояса Земли. И наконец, могут быть введены эффекты геомагнитного экранирования на высокоширотных участках орбиты, а также соответствующие им интенсивности потоков протонов от солнечных вспышек. Таким образом, можно объединять и группировать данные по РУФ любым желаемым способом — в виде последовательности или в виде средних значений — и соотносить их с одновременно протекающими солнечными и геофизическими процессами.

Этот пакет программ в настоящее время используется для определения характеристик фонового тока и для сопоставления величин модуляции темнового тока с высокоширотными явлениями и с характеристиками частиц в окружающей магнитосфере. Мы начинаем теперь анализ данных по РУФ с применения этого пакета программ. Он будет также применен к рядам

данных, которые предполагают получить в будущих экспериментах по РУФ на спутниках «Нимбус-G» и «Тайрос-N».

2.2. ИЗМЕРЕНИЯ НА РАКЕТАХ И АЭРОСТАТАХ ПО ПРОЕКТАМ «АВРОРОЗОН-I, II»

Спутниковые данные по РУФ крайне полезны при сопоставлении как в локальном, так и в глобальном масштабе отклика атмосферного озона с конкретными геомагнитными явлениями. Однако на измерения РУФ наложен ряд ограничений, уменьшающих сферу их применения. Они не могут представлять данные об отклике O_3 в ночных условиях. С их помощью невозможно также измерить ни параметры, связанные с характеристиками геомагнитного явления, ни величину энергии, непосредственно поступающей на стратосферные высоты, ни химические или физические процессы, приводящие к наблюдаемой модуляции O_3 . Эти процессы могут быть глубоко изучены только при помощи хорошо скоординированных и спланированных измерений соответствующих параметров непосредственно в среде, с борта ракет или аэростатных платформ.

Например, последние результаты были получены во время экспериментов «Авророзон-I» (сентябрь 1976 г.) и «Авророзон-II» (март 1978 г.). В этих экспериментах запуски ракет и аэростатов производились с исследовательского полигона Покер Флэт, Аляска; каждый из экспериментов включал в себя большое количество запусков. Для осуществления программы скоординировали свои усилия ученые нескольких университетов и исследовательских лабораторий. Были представлены следующие организации: Центр космических полетов им. Годдарда НАСА (GSFC), Морская исследовательская лаборатория (NRL), Денверский университет, Техасский университет в Эль-Пасо, Пенсильванский государственный университет, университет штата Юта, Вашингтонский университет, Лаборатория атмосферных исследований (ASL) ракетного полигона в Уайт-Сэндс и Международная организация по космическим исследованиям (SRI).

Проект «Авророзон-I» был первой совместной попыткой экспериментально обнаружить авроральное тормозное рентгеновское излучение в нижней мезосфере и стратосфере, изучить эффект его прямого воздействия на озон, электропроводность, ионизацию, подвижность ионов и на метеорологическую структуру. Были запущены две ракеты «Найк Томагавк», несущие аппаратуру для измерений распределения энергии заряженных частиц и рентгеновского излучения, 7 хемолюминесцентных и оптических датчиков озона, 7 датчиков проводимости и зондов Жердьена для измерения электрических параметров стратосферы и 17 датчиков для измерения температуры, плотности и

ветра. Эти запуски были скоординированы с полетами 5 больших аэростатов, на которых проводились измерения рентгеновского излучения, проводимости и космических лучей на высотах около 40 км. Дополнительно использовались 4 датчика озона

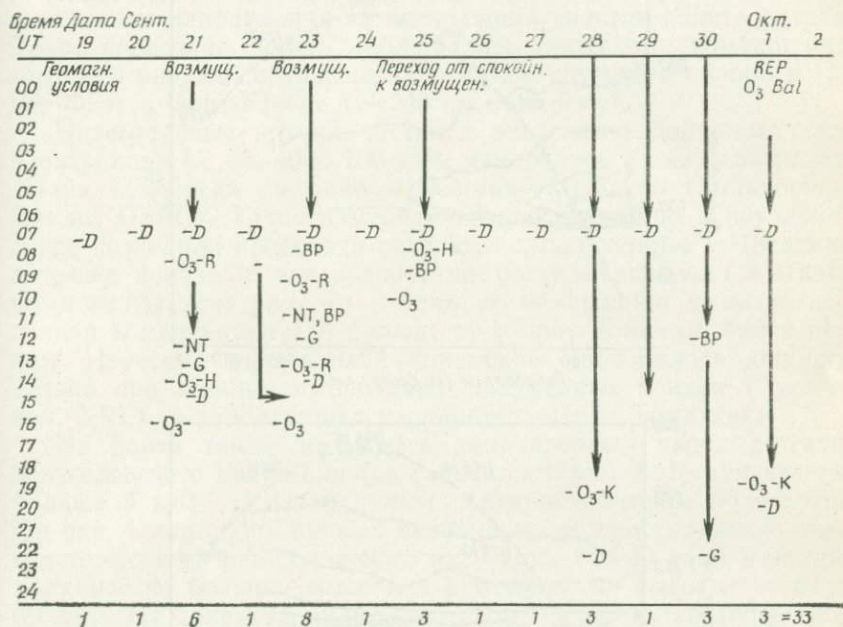


Рис. 2. Эксперимент «Авророзон-1». Хронологическая последовательность запусков.

Условные обозначения: O₃ — Н Хилсенрат ВР — штыревой зонд (σ) D — шарзонд O₃ — R Рандхава G — зонд Жердьена (Ne и σ) BAL — аэростат O₃ — К Крюгер NT — «Найк Томагавк».

Наземные эксперименты: радар в Чатанике, риометры, магнитометры, камеры полного обзора неба.

на шарах-зондах — для измерений озона вплоть до 30 км. Близко расположенная радарная система обратного рассеяния в Чатанике также работала во время полетов «Найк Томагавк», поставляя данные для предсказания, проверки и картирования выделения энергии электронами.

Рис. 2 отображает логическую последовательность проведения эксперимента «Авророзон-1». Два явления, представляющих интерес, произошли 21 и 23 сентября. Каждое из этих ароральных явлений, характеризовавшихся умеренной интенсивностью рентгеновского излучения, было изучено в серии последовательных ночных запусков. Приведенные здесь результаты представ-

ляют характеристики каждого явления и отражают соответствующие изменения некоторых избранных параметров средней атмосферы.

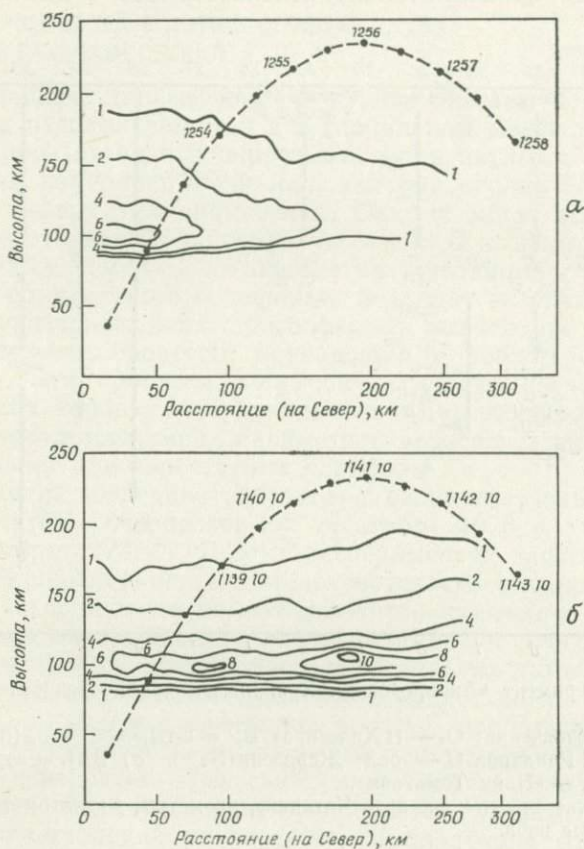


Рис. 3. Карты контуров равной электронной концентрации (Чатаника) и траектории ракет «Найк Томагавк» в эксперименте «Авророзон-1». а — запуск 21 сент. 1976 г. б — запуск 23 сент. 1976 г.; цифры у точек траектории обозначают мировое время. Электронная концентрация на контурах в единицах 10^5 см^{-3} .

Карты контуров равной концентрации электронов были получены на радиолокаторе в Чатанике (Вондраком и Уиквером) во время полетов ракет «Найк Томагавк», они представлены на рис. 3 вместе с траекториями ракет. Интенсивность авроральных явлений оценивается по величине электронной концентрации. Исходя из этого признака, мы видим, что явление 21 сентября было интенсивным на начальном участке подъема

ракеты (который находился близко над тем местом, где проводилось зондирование стратосферы); затем его интенсивность постепенно снижалась в горизонтальном направлении до значений, соответствующих фоновым, спокойным условиям. Событие 23 сентября было более интенсивным и простиралось в горизонтальном направлении за нисходящий участок полета ракеты. Такое поведение сияния наблюдалось также при помощи риометров и визуально, при помощи камер кругового обзора в Поркер-Флэт и Форт-Юконе (~ 200 км в сторону).

Интегральные потоки частиц с энергиями, большими (для электронов) 15, 25, 40 и 100 кэВ, измерялись на каждой ракете «Найк Томагавк» счетчиками Гейгера—Мюллера (Гольдберг и Джонс, GSFC). Такие измерения непосредственно в изучаемой среде позволяли проверять результаты, полученные в Чатанике, а также показали, что возрастание более энергичной (> 40 кэВ) компоненты электронного потока по отношению к низкоэнергичной компоненте было больше во втором событии, чем в первом. Изучение авроральной ионосферы проводилось дополнительно при помощи импульсных плазменных зондов (Зусичевич, NRL), установленных на ракетах «Найк Томагавк».

На борту также находился направленный вверх детектор рентгеновского излучения (со сцинтиллятором NaI) для энергии больше 5 кэВ с 4-канальным дискриминатором по энергии. На рис. 4 для обоих ночных явлений проведено сравнение энергии тормозного рентгеновского излучения (5—40 кэВ) с экстраполяцией на большие высоты в атмосфере на высотах от 80 до 30 км. Из рисунка видно, что свойства обоих событий были сходны, а рентгеновское излучение достигало максимального значения в районе 60 км. Изменение величины выделения энергии с высотой показывает, что во втором событии имела значительная высокоэнергичная компонента — в соответствии с измерениями распределения порождающих излучение электронов. Выше 50 км отношение величин, соответствующих второму и первому событию, около 2.

Данные по O_3 были получены как при помощи хемолюминесцентного зондирования (ночью), так и при помощи оптического зондирования (днем). На рис. 5 показаны данные группы GSFC по относительной весовой концентрации O_3 . Были получены два ночных высотных профиля этой величины: 21 сентября в течение первого аврорального явления и 25 сентября; последняя дата использовалась как контрольная и соответствовала спокойным условиям ночью (Хилсенрат, GSFC). Точками показаны также высотные профили, полученные при двух зондированиях в дневных условиях, проведенных спустя неделю (Крюгер, GSFC). Результаты указывают на увеличение содержания озона в начале ночи, которое после захода Солнца может быть

вызвано образованием озона в процессе присоединения атомарного кислорода. Затем на высотах, больших 50 км, видно следующее за авроральным явлением уменьшение содержания O_3 до значений, близких к дневным. Дополнительное подтвержде-

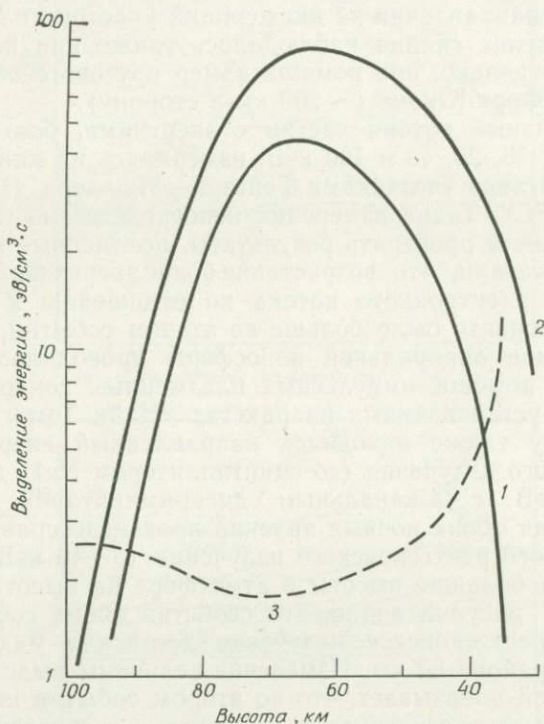


Рис. 4. Выделение энергии в атмосфере рентгеновскими лучами 5—40 КэВ, возникшими за счет тормозного излучения во время событий 21 и 23 сент. 1976 г., по данным эксперимента «Авророзон-1». 1 — запуск 21 сент. 1976 г.; 2 — запуск 23 сент. 1976 г.; 3 — отношение энерговыделений.

ние этого эффекта было найдено в результатах двух опытов по хемолюминесцентному зондированию в течение 23 сентября (Рандхава, ASL). В обоих случаях на высотах больше 50 км наблюдалось значительное (более чем на 25 %) уменьшение концентрации O_3 . Эти результаты оказываются неожиданными, поскольку при использовании фотохимических моделей нейтрального состава такие уменьшения не могут быть объяснены выделением энергии.

Эффекты рентгеновского и корпускулярных ионизирующих излучений иллюстрируются рис. 6 (Митчелл, Техасский универ-

ситет), где представлены три последовательных измерения проводимости в течение 23 сентября. Профили были сняты в 22 00 по нью-йоркскому времени (перед началом) и в 01 37 (во время события) одиночным зондом, а также в 02 20 зондом Жердьена. Этот последний прибор одновременно измеряет проводимость и ионизацию, что позволяет оценить подвижность и, следовательно, размеры ионов.

Ниже 50 км все три профиля параллельны и примерно одинаковы, что отражает преобладание в этой области ионизации космическими лучами. Повышенная проводимость выше 50 км обусловлена образованием ионов рентгеновскими лучами и энергичными электронами. Можно предполагать, что более низкое расположение области перегиба и кривой, полученной при втором зондировании, обусловлено повышенным рентгеновским излучением в соответствии с рис. 4. Результаты указывают на существование быстрых изменений электрических параметров

в пространстве и во времени и на необходимость одновременных измерений характеристик источников энергии. Последние результаты были получены недавно, во время проведения эксперимента «Авророзон-II» (март 1978 г.). В рамках этого эксперимента нами был разработан и успешно запущен новый полетный блок к ракете «Аркас» (10 см в диаметре и весом 8,2 кг). Этот блок (XRG) изображен на рис. 7. Он включает в себя зонд Жердьена для измерений проводимости, концентрации ионов и их подвижности, сцинтилляционный детектор NaI для измерения рентгеновского излучения в четырех диапазонах, охранный счетчик для измерений энергичных электронов и контрольный прибор для определения элект-

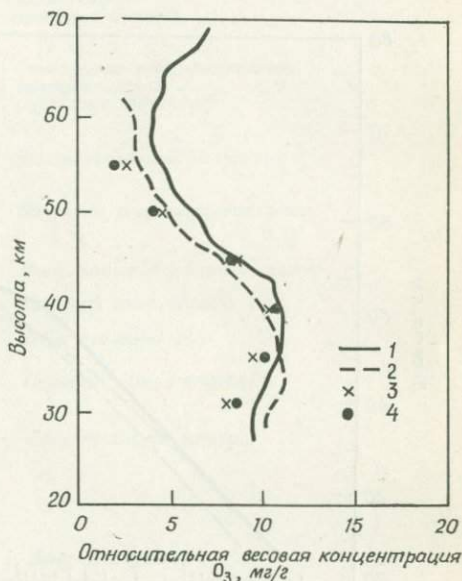


Рис. 5. Примеры отклика O_3 на выделение энергии в высоких широтах во время эксперимента «Авророзон-1». Хемолуминесцентные датчики (ночные измерения): 1 — запуск 21 сент. 1976 г. в 19 ч 47 мин; 4 — запуск 1 окт. 1976 г. в 19 ч 15 мин. Полигон Покер Флэт, Аляска; время — UT.

трического поля, включающий в себя антенны для измерения разности потенциалов в атмосфере. Для установления постоянного направления платформы использовался двухосный магнитометр. Перечисленные инструменты уже запускались ранее в виде отдельных полетных блоков на метеорологических раке-

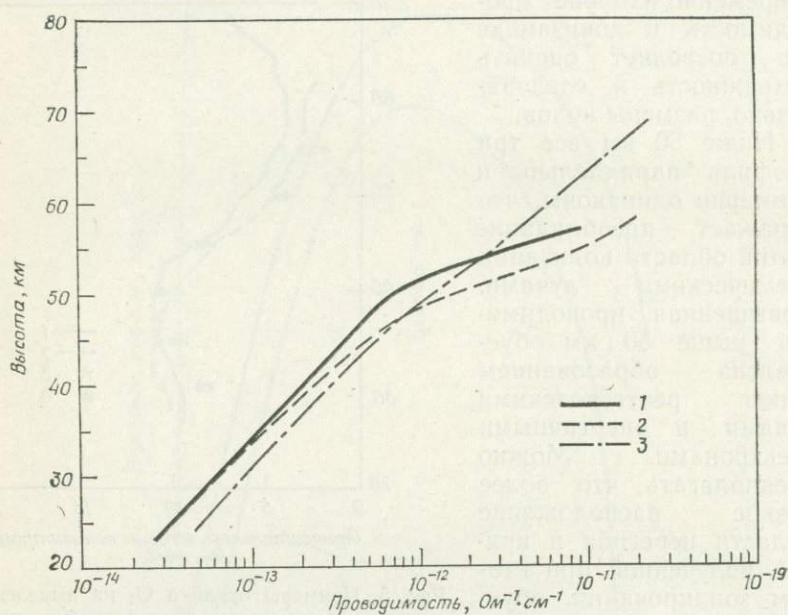


Рис. 6. Профили проводимости до, во время и после события 23 сентября 1976 г. 1 — 22 сент. 1976 г., 22 ч 00 мин; 2 — 23 сент. 1976 г., 01 ч 37 мин; 3 — 23 сент. 1976 г., 02 ч 20 мин. Полигон Покер-Флэт, время нью-Йоркское.

тах, однако до разработки блока XRG никогда не работали в одном комплексе. Эти новые комплексы открывают широкие возможности для правильной интерпретации наблюдений временных и пространственных характеристик реакции атмосферы на быстро изменяющиеся авроральные явления, связанные с рентгеновским излучением.

Предварительный просмотр результатов, полученных при помощи блока XRG в эксперименте «Авророзон-II», уже привел к повторному изучению данных эксперимента «Авророзон-I» и открытию того, что во время двух событий основным источником энерговыделения в атмосфере на высотах больше 55 км было высыпание релятивистских электронов (Баркус, частное сообщение). Результаты для явления 23 сентября 1976 г. представлены на рис. 8; спектр электронов с энергиями от 15 до

150 кэВ, соответствующий рисунку, был определен по данным, полученным над атмосферой. Затем спектр был продолжен вплоть до энергии 550 кэВ путем изучения изменения потока

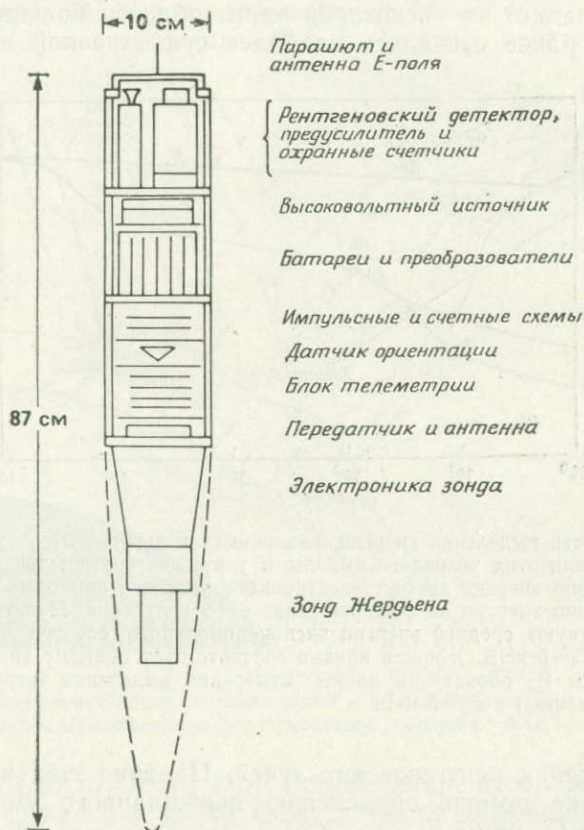


Рис. 7. Блок приборов XRG ракеты «Супер Аркас».

с высотой по данным, полученным в атмосфере на участках подъема и спуска. Спектр оказался двухкомпонентным. Рассчитанные профили выделения энергии за счет непосредственно электронного удара (E) и за счет тормозного рентгеновского излучения (X) представлены на рис. 8 для обеих компонент (со средней энергией экспоненциального спектра ~ 5 и ~ 100 кэВ). Проводится их сравнение с измеренным вкладом рентгеновских лучей и фоном космических лучей. Для этого события ясно, что вклад в энерговыделение непосредственно от процессов электронного удара преобладает выше 55 км, в то

время как поглощение рентгеновских лучей наиболее существенно между 40 и 55 км. По нашим данным о других авроральных событиях также следует, что ионизация электронным ударом преобладает в некоторой части области больших высот, в которой ранее считалась наиболее существенной ионизация

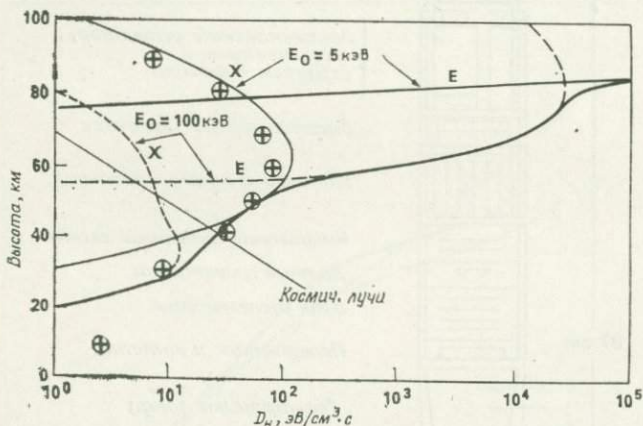


Рис. 8. Скорость выделения энергии, измеренная в запуске 23 сент. 1976 г. и вычисленная для этих условий. Символы E у кривых соответствуют измеренному выделению энергии за счет электронного удара, а символы X — расчетному выделению энергии за счет рентгеновского излучения. Пунктирные кривые соответствуют средней энергии экспоненциального спектра $E=100$ кэВ, а сплошные $E_0=5$ кэВ. Жирная кривая соответствует полному энергосодержанию. Символом \oplus обозначены данные измерений выделение энергии рентгеновским излучением с $E_0=5$ кэВ.

при поглощении рентгеновских лучей. Наличие этих излучений может также помочь объяснению неожиданного уменьшения содержания O_3 на 25 %.

2.3. ТЕЛЕСКОП ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ СО СТАНЦИИ «СПЕЙСЛЭБ» (АХЕТ)

Программа исследований на ракетах и аэростатах предназначена для изучения энергетики высокоширотных явлений вплоть до высот стратосферы. Важной задачей является также построение карты частот появления и планетарной протяженности источников этой энергии. В эксперименте АХЕТ на космической станции «Спейслэб» предполагается получать изображения, а также измерять пространственные, временные и спектральные распределения для явлений, происходящих в верхней атмосфере при высыпаниях электронов. Этот замысел иллюст-

рирует рис. 9. Чувствительный элемент будет помещаться на выносной платформе, расположенной под углом и выше по отношению к рентгеновскому источнику в атмосфере. Область в атмосфере, где за счет тормозного излучения образуются рентгеновские лучи с энергиями от 5 до 150 кэВ, располагается на

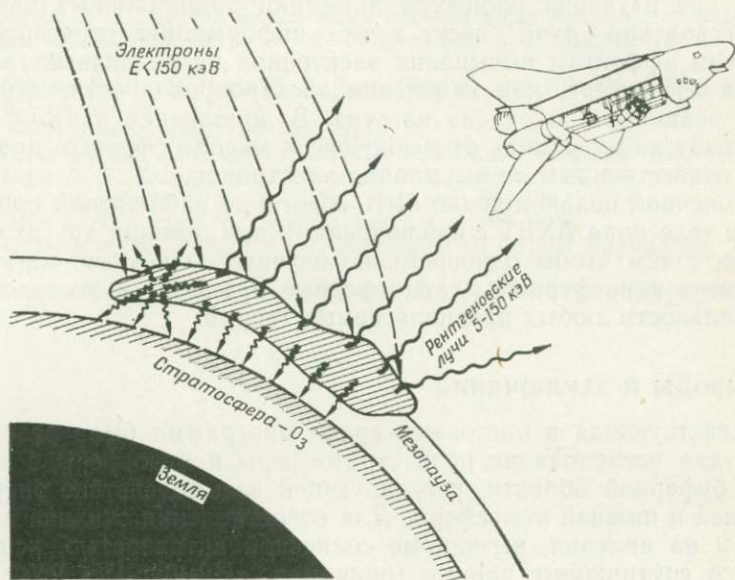


Рис. 9. Изображение объекта наблюдений и общей идеи исследований при помощи телескопа атмосферного рентгеновского излучения АХЕТ.

высотах от 80 до 120 км [15]. Рентгеновские изображения (в области энергии от 5 до 25 кэВ), а также информация другого вида (для энергий 25 кэВ) формируются пространственно-чувствительными односторонними пропорциональными счетчиками в сочетании с коллиматорами. Чувствительность прибора АХЕТ будет обеспечивать пространственное разрешение объекта с характерными размерами 200 км, находящегося на расстоянии до 1500 км. Из-за возможных фоновых помех в приборе за счет высыпаний электронов требуется проведение дистанционных наблюдений источника из положения под углом и в стороне от области высыпания первичных электронов.

Сопутствующие наблюдения соответствующих солнечных и земных явлений позволят определить, какие физические связи могут существовать между рентгеновскими полярными сияниями, солнечной активностью и процессами в атмосфере. Рентгеновские лучи, образовавшиеся за счет тормозного излуче-

ния, обычно вызывают наибольший эффект в атмосфере между 40 и 75 км, где поглощаются в основном лучи с энергиями от 15 до 25 кэВ. Наблюдение авроральных рентгеновских лучей будет также давать информацию о первичных электронах, выпадающих из радиационных поясов, и может быть использовано для изучения процессов динамики радиационных поясов. Рентгеновские лучи несут в себе информацию, относящуюся к таким эффектам выпадения электронов на различных глубинах в атмосфере, как изменения электропроводности, химических реакций и джоулева нагрева. В дополнение к этому они содержат информацию, относящуюся к магнитосферным процессам, ответственным за выпадения электронов.

Конечной целью должно быть сочетание наблюдений при помощи телескопа АХЕТ с наблюдениями при помощи других приборов, с тем чтобы одновременно изучать солнечные, магнитосферные, ионосферные и атмосферные процессы и исследовать правильность любых предполагаемых теорий.

3. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Действующая в настоящее время программа была разработана для исследования роли стратосферы и мезосферы в качестве буферной области, регулирующей взаимодействие энергий верхней и нижней атмосферы. Для сопоставления отклика атмосферы на явления, вызванные солнечной активностью, используются спутниковые данные (например, «Нимбус-IV» РУФ O_3). Проекты согласованных измерений на ракетах и аэростатах (например, «Авророзон-I, II») положили начало изучению эффектов, происходящих непосредственно в атмосфере и вызванных корпускулярным излучением в высоких широтах.

В настоящее время составляются планы определения пространственной протяженности и планетарного распределения этих излучений — частично за счет таких исследований, как эксперименты на станции «Спейслэб», проводимые при помощи телескопа для наблюдения рентгеновского излучения атмосферы.

Предварительные результаты уже показали, что атмосфера крайне чувствительна к рассмотренным видам излучения. Нам следует теперь установить длительность и масштабы таких явлений, с тем чтобы прийти к пониманию возможного их влияния на погоду и климат в тропосфере.

Литература

1. Schuurmans C. J. E., Oort A. H. Pure Appl. Geophys. 75, 233, 1969.
2. Wilcox J. M., Scherrer P. H., Svalgaard L., Roberts W. O., Olson R. H. Science 180, 185, 1973.

3. *Wilcox J. M.* Geophysical Predictions: Sun—Weather, Institute for Plasma Research, Stanford University, SUPR Report No. 687, March 1977.
4. *Clayton H. H.* World Weather, The McMillan Company, New York, 1923.
5. *Roberts W. O.* Possible Relationships Between Solar Activity and Meteorological Phenomena, ed. by W. R. Bandeen and S. P. Maran, NASA SP-366, p. 13, 1975.
6. *Willis D. M. J.* Atmos. Terr. Phys., 38, 685, 1976.
7. *Dessler A. J.* Possible Relationships Between Solar Activity and Meteorological Phenomena, ed. by W. R. Bandeen and S. P. Maran, NASA SP-366, p. 187, 1975.
8. *Herman J. R., Goldberg R. A.* Sun, Weather and Climate, NASA SP-426, 1978 (in press).
9. *Thorne R. M.* Science, 195, 287, 1977.
10. *Weeks L. H., Cuikay R. S., Corbin J. R.* J. Atmos. Sci., 29, 1138, 1972.
11. *Heath D. F., Krueger A. J., Crutzen P. J.* Science, 197, 886, 1977.
12. *Maeda K., Heath D. F.* Bull. Am. Met. Soc., 55, 1902, 1974.
13. *Callis L. B., Nealy J. E.* Geophys. Res. Lett., 5, 249, 1978.
14. *Goldberg R. A., Hallam K. L., Emming J. G.* Optical Engineering, 17, 63, 1978.
15. *Berger M. J., Seltyer S. M., Maeda K. J.* Atmos. Terr. Phys., 36, 591, 1974.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ДАННЫХ ПО МЕТОДУ НАЛОЖЕННЫХ ЭПОХ

Б. Джамисон, Р. Регал

Для определения вклада отдельных событий в физический процесс, случайный по своей природе, или для выделения этих событий на фоне случайного шума ошибок, искажающих измерения, широко используется метод наложенных эпох. Так как этот метод является статистическим, то возникает вопрос о статистической значимости результатов такого анализа. Мы обсудим эти вопросы не с точки зрения общих рассуждений, а в связи с недавними использованиями этого метода [1, 5, 6] для случая, когда событиями являются прохождения границ солнечного сектора, а в качестве параметра физического процесса, отражающего эти события, выбраны индексы завихренности (VAI), данные Олсоном, Робертсом и Герети [3].

Пусть V_1, V_2, \dots — последовательность величин индекса завихренности для полуночи и полудня каждого дня, начиная с полуночи 1 янв. 1963 г. (начало отсчета выбрано так, чтобы можно было использовать ключевые дни, приведенные в табл. 1 работы [5]). Рассмотрим 54 пересечения секторной границы, приведенные в [5]. (Обычно момент прохождения секторов приписывается определенным половинам дня, как это представлено в [5] и [2]). Для семи прохождений из 54 рассматриваемых справедливость отнесения их к определенному интервалу времени, соизмеримому с полуднем, представляется сомнительной. Поэтому мы будем рассматривать только 47 прохождений. Пусть $T_1 \dots T_{47}$ — половины дня, когда происходят пересечения секторов. Будем считать T_i *ключевыми половинами*. Пусть d — фиксированное целое число. (В примерах мы приняли $d=12$, но нам проще будет продолжать наше изложение, если в формулах мы будем использовать d , а не 12.) Для каждого $k=1, \dots, 47$ последовательность из $2d+1$ половин дней от T_k-d до T_k+d назовем *k-й эпохой*. Для каждого такого k пусть существует $V_{k,i}$, которое представляет собой индекс завихренности (VAI) в i -й день k -й эпохи, где i меняется от $-d$ до $+d$; так что $V_{k,i} = V_{T_k+i}$. Теперь для каждого $i=-d, \dots, d$ значение

\bar{V}_i будет среднее по 47 эпохам индекса завихренности, отнесенное к i -й половине дня:

$$V_i = \frac{1}{47} \sum_{k=1}^{47} V'_{ki}, \quad i = -d, \dots, d. \quad (1)$$

Если это проделать, то станет очевидным, что \bar{V}_2 — среднее значение индекса завихренности спустя день после прохождения секторов, меньшее чем другие \bar{V}_i . Является ли это отклонение статистически значимым?

Для определения уровня значимости, согласно теории математической статистики, требуется задание статистических гипотез. В пособиях по статистике обычно указываются две гипотезы: нуль-гипотеза и альтернативная. Обычно используется только нуль-гипотеза, в то время как альтернативная гипотеза опускается вообще. Статистическая значимость определяется только на основе нулевой гипотезы. Проводится эксперимент, результат которого является неопределенным. Эксперимент обычно состоит из совокупности отдельных подэкспериментов, производимых при идентичных условиях, причем результаты всех подэкспериментов независимы.

Результатом эксперимента является некоторое число x , и поскольку результат его является неопределенным, то можно рассматривать x как значение случайной переменной X . Статистической гипотезой является утверждение H о распределении X . Понятие уровня значимости можно применять в том случае, когда по принятой гипотезе об H можно вычислить для каждого возможного x вероятность $P(|X| \geq x)$ того, что результаты измерений переменной X по крайней мере не меньше x . Иногда используют $P(X \leq x)$ или $P(X \geq x)$, вместо $P(|X| \geq x)$. Если в эксперименте получено значение переменной X , равное x_0 , то вероятность $P(|X| \geq x_0)$ [или $P(X \leq x_0)$, или $P(X \geq x_0)$] является *уровнем значимости*.

Нуль-гипотеза H может рассматриваться как перевод на язык математики предсказания научных теорий о результате эксперимента. В рассматриваемом случае, по мнению большинства метеорологов (по крайней мере до недавнего времени), прохождение Землей секторной границы имеет столь малый энергетический эффект, что не может оказывать ощутимого влияния на ВАИ. Следовательно, ключевые дни не могут быть использованы для построения выделенной системы отсчета, с помощью которой могут быть вычислены (например, методом наложенных эпох) основные статистические характеристики ВАИ. Более точные математические выражения при оценке уровня значимости были предложены в работах [1, 5, 6]. Кратко опишем нашу точку зрения на эту проблему. График

VAI представляет собой осцилляции, накладывающиеся на синусоидальную волну с периодом около 1 года. Пусть функция $P(t)$, где t измерено в половинах дня, построенная по методу наименьших квадратов, представляет такую синусоидальную волну для VAI. Это $P(t)$ можно выразить в виде

$$P(t) = 42,00 + 12,98 \cos \omega t + 6,54 \sin \omega t, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi/730,5$ рад. Положим $R(t) = V(t) - P(t)$. График $R(t)$ за период с 1963 по 1970 г. не содержит явных периодических составляющих и колеблется вокруг нуля. Это приводит к следующей формулировке нулевой гипотезы: $R(t)$ — стационарный процесс с нулевым средним значением. Это само по себе не является достаточно четкой гипотезой, на которой основаны расчеты уровня значимости, поэтому мы также предполагаем, что $R(t)$ представляет собой случайную величину с нормальным законом распределения. Предварительно мы проверили это допущение приближенным способом, построив гистограмму отклонений, и получили хороший результат. Пусть σ — стандартное отклонение $R(t)$. Используя экспериментальные данные, мы получим значение для $\sigma \approx 13,23$. Пусть $\rho(k)$ — значение автокорреляционной функции $R(t)$ с запаздыванием, равным k половинам дня. Наша оценка $\rho(k)$ представлена на рис. 1. (Она была получена путем усреднения оценок $\rho(k)$ для каждого из 8 лет за период от 1963 до 1970 г.) В вычислениях, необходимых для расчета уровня значимости, мы допускали несколько произвольно, что $\rho(k) \approx 0$, если $|k| \geq 60$ половин дня.

Пусть $R_{k,i}$ определяется из $R(t)$ так же, как $V_{k,i}$ из $V(t)$. Пусть

$$X = \frac{1}{47} \sum_{k=1}^{47} \left[R_{k2} - 1/(2d+1) \sum_{i=-d}^d R_{k,i} \right].$$

Предположение, что среднее значение $R(t)$ равно 0, означает, что среднее значение $E(X)$ для данного X также равно 0. Наша оценка $\rho(k)$ и выражение для дисперсии суммы в терминах вариации и ковариации слагаемых показывает, что стандартное отклонение $\sigma(X)$ величины X равно примерно $0,121 \sigma$. Уилкокк информировал нас на конференции, что осцилляции VAI больше зимой, чем летом, поэтому наша первоначальная оценка σ , равная примерно 13, является слишком заниженной. После конференции мы провели повторную оценку σ по данным $V(t)$ для зимних месяцев рассматриваемого периода и получили оценку $\sigma \approx 14$, что дало значение для $\sigma(X) = 1,7$. Наблюдаемое значение X , а именно $-7,1$, таким образом, на $4,17 \sigma$ ниже принятого среднего значения, равного 0. Предположение, что $R(t)$ имеет нормальное распределение, подразумевает, что X также

распределено нормально. Поэтому вероятность того, что значение нормально распределенной случайной величины окажется ниже среднего на 4 стандартных отклонения, равна 0,00003.

Интерпретация этого числа как уровня значимости в ранее определенном смысле не годится. Данные, использованные при расчете уровня значимости методом наложенных эпох, позволили выделить довольно глубокий минимум \bar{V}_i через сутки после

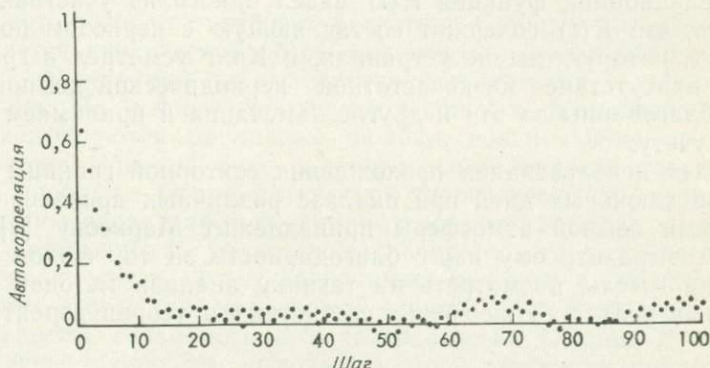


Рис. 1. Автокорреляция среднегодовых значений VAI за 1963—1970 гг.: шаги от 1 до 100.

ключевого дня. Эта особенность данных позволила выбрать статистику для X , что мы и сделали. При вычислении значения 0,00003 как вероятности того, что X является отрицательным, как это и оказалось, не принимался во внимание факт отбора X , поскольку X , или что-то ему подобное, существенно отрицательно. (Однако из наших результатов следует, что вероятность того, что любое из 25 значений

$$X_i = \frac{1}{47} \sum_{k=1}^{47} \left[R_{kj} - \frac{1}{(2d+1)} \sum_{i=-d}^d R_{ki} \right]$$

отличается по абсолютной величине от 0 так же, как $X = X_2$ не превышает $2 \cdot 25 \cdot 0,00003 = 0,0015$.)

Разумеется, используя новые данные, можно вычислить заново уровень значимости гипотезы, которую теперь можно выдвинуть, предварительно рассмотрев эти данные. Имеются в распоряжении новые сведения о ключевых днях; однако результаты [1] и [6] показывают, что использование новых данных приводит примерно к тому же уровню значимости (относительно других оценок рассматриваемой ситуации см. [4]).

Когда мы представляли эти результаты на симпозиуме, там было высказано несколько критических замечаний и предложено

ний. Тот факт, что $\sigma(V(t))$ больше зимой, чем летом, показывает, что допущение о стационарности $R(t)$ не правильно. Процедура обработки данных, используемых для получения VAI относящихся к полуночи, отличается от таковой для полудня. Это является дополнительным источником нестационарности $R(t)$, но более существенно это влияет на нашу оценку $\sigma = \sigma(R(t))$. Это было также отмечено Уилкоксом. График автокорреляционной функции $R(t)$ навел одного из участников на мысль, что $R(t)$ содержит составляющую с периодом порядка 27 сут, которую мы не устранили, и Кинг усмотрел в графике $R(t)$ присутствие низкочастотной периодической компоненты. Мы благодарны за эти и другие замечания и принимаем меры к их учету.

Идея использования прохождения секторной границы в качестве ключевых дней при анализе различных проявлений активности земной атмосферы принадлежит Марксону [2]. Мы хотим выразить ему нашу благодарность за то, что он навел нас на мысль, посмотреть на технику анализа методом наложенных эпох с точки зрения статистики и теории вероятности.

Литература

1. Hines C. O., Halevy I., J. Atmos. Sci., **34**, 382, 1977.
2. Markson R., Pure and Appl. Geophys. **84**, 161, 1971.
3. Olson R. E., Roberts W. O., Gerety E., Solar-Terrestrial Physics and Meteorology, Working Document II, SCOSTEP (1977).
4. Shapiro R., J. Atmos. Sci., **33**, 865, 1976.
5. Wilcox J. M., Scherrer P. H., Svalgaard L., Roberts W. O., Olson R. H., Jenne R. L. J. Atmos. Sci., **31**, 581, 1974.
6. Wilcox J. M., Svalgaard L., Scherrer P. H., J. Atmos. Sci., **33**, 1113, 1976.

СВЯЗЬ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ И ПОГОДЫ — НЕ РЕЗУЛЬТАТ ЛИ УДАЧНЫХ ОПЫТОВ САМОВНУШЕНИЯ?

А. Б. Питток

В свете того, что известно о системе Солнце—погода—климат, дается критический обзор результатов, связывающих оди-ночный и двойной циклы солнечной активности с погодой и климатом. На основе литературных данных рассматриваются и иллюстрируются различные ошибки, возникающие при использовании или при недостаточном использовании статистики в этой проблеме. Обзор литературы показывает, что, несмотря на большое число работ по данному вопросу, все еще не получено сколько-нибудь убедительных свидетельств реального существования связи между солнечными циклами и погодой или климатом, хотя для временных масштабов в несколько дней свидетельства связи погоды с явлениями на Солнце, по-видимому, существуют. Эти выводы по своей тенденции поддерживают впечатление А. С. Монина об «удачных опытах самовнушения» и недавнее высказывание С. Дж. Гоулда о том, что бессознательная манипуляция данными, возможно, является нормой в науке. Предложены некоторые критерии, которые могут служить как вспомогательное средство для оценки наших собственных работ и работ других ученых, и высказано предположение, что, вероятнее всего, прогресс возможен в изучении солнечно-погодных эффектов, характеризующихся более короткими масштабами времени. Развернутый вариант этой статьи можно найти в выпуске журнала «Reviews of Geophysics and Space Physics» за август 1978 г.

1. ВВЕДЕНИЕ

Советский метеоролог Монин [1] заявил, что наличие связи между погодой на Земле и флуктуациями солнечной активности «было бы для метеорологии почти трагедией, так как оно с очевидностью означало бы, что прежде чем прогнозировать погоду, необходимо сначала прогнозировать солнечную активность». Он отверг собранные доказательства о влиянии

А. В. Pittock, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, AZ 85721 USA.

солнечной активности на погоду, заявив, что «они, к счастью, производят впечатление лишь удачных опытов самовнушения».

С другой стороны, согласно Лесику [2], первая Всесоюзная конференция по проблеме «Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды», состоявшаяся в 1972 г. в Москве, приняла резолюцию, в которой сказано, что «... исследования, проводимые в СССР и за рубежом, позволяют считать доказанным наличие существенного влияния солнечной активности и других космическо-геофизических факторов на атмосферные процессы... Результаты их в ряде случаев имеют прогностическое значение...».

На Западе широко известна статья Кинга [3] о солнечно-погодных связях, который привел поразительно большое количество опубликованных и неопубликованных «свидетельств», которые, хотя и содержат некоторые изъяны, все интерпретируются как подтверждение наличия таких связей. Из приведенных им 85 библиографических ссылок (перечисленных в репринте, распространенном SCOSTEP [4]) ни в одной не упоминаются свидетельства против таких связей. Однако в более объективных обзорах [5, 6] отмечено много противоречий, встречающихся в литературе. Таккер заявил, что «ввиду неубедительности и подчас противоречивости рассмотренных данных необходимо серьезно обсудить, является ли гипотеза о солнечно-погодных связях настолько продуктивной, чтобы ей можно было следовать в будущем» [5]. Он отметил, что «многие данные были плохо обработаны... (и) исследователи позволяли предвзятым идеям воздействовать на их суждения... Тем не менее некоторые из доказательств невозможно отвергнуть...»

Я только что завершил обширный обзор последних литературных данных, сконцентрировав внимание на возможном влиянии одиночного и двойного циклов солнечной активности (с периодами приблизительно 11 и 22 года) на погоду и климат. Эта работа заставляет меня согласиться с Гани [7], который в другом контексте сделал вывод, что «многие из представленных аргументов базируются на слабой основе... В климатологических работах очень недостаточен статистический анализ, и в некоторых случаях он либо поверхностен, либо ошибочен».

В этом сокращенном изложении значительно более обширного обзора [8] я обрисую некоторые из заблуждений, возникающих при использовании статистики применительно к рассматриваемой проблеме, и приведу примеры из литературы. Затем будут обобщены основные выводы, почерпнутые из литературы, и прокомментировано их значение.

2. СУЩЕСТВО ВОПРОСА

Погода и климат весьма изменчивы во всех масштабах времени [9, 10], и только часть этой изменчивости можно обобщенно приписать циклам солнечной активности [11]. Например, Питток [12] распределил дисперсию еженедельных измерений вертикального распределения O_3 за 8 лет по компонентам, обусловленным синоптическими погодными системами, аппаратным шумом, сезонными вариациями и межгодовой и трендовой компонентами. Только межгодовая компонента превышала 20 % от полной дисперсии содержания озона в атмосфере над уровнем порядка 30 км, а максимум компоненты, обусловленной трендом (т. е. во временном масштабе более 8 лет), составлял менее 4 % от полной дисперсии. Следовательно, если нас интересует сигнал, вызванный циклом солнечных пятен с периодом 11 или 22 года, мы вынуждены рассматривать только 4 % от полной дисперсии, а остальные 96 % считать для наших целей «шумом». Это накладывает жесткие ограничения на статистическую степень достоверности выводов, полученных из заведомо ограниченных наборов данных.

Климатические данные также весьма хорошо коррелируются на больших расстояниях, поэтому мы не можем заменять какие-либо данные другими (по большому числу станций за более долгие периоды времени) и при этом быть уверены, что дополнительные данные независимы. Вместо использования данных N станций, уменьшающих неопределенность любой оценки на величину $(N-1)^{-0,5}$, мы ограничиваемся самое большее приблизительно 10 независимыми наборами данных в глобальном масштабе, поэтому и коэффициент уменьшения неопределенности у нас не превышает ~ 3 .

Изменчивость солнечной постоянной в течение цикла солнечных пятен обычно принимают менее 1 % [13, 14], хотя точные прямые измерения ее со спутников начали проводить лишь в 1975 г. Последние оценки верхнего предела этой изменчивости в 0,1 %, возможно, более реалистичны. Поэтому физические гипотезы о воздействии на погоду сосредотачиваются в основном на «спусковых» механизмах того или иного рода, управляемых обычно или более изменчивой, но энергетически незначительной радиацией в коротковолновой ультрафиолетовой области спектра, или ионизирующими частицами, модулированными солнечным магнитным полем.

Почти все существующие физические гипотезы выдвигались для того, чтобы объяснить наблюдаемые и предположительно значимые корреляции между солнечными индексами (такими, как число солнечных пятен) и рядами климатологических дан-

ных, но, к сожалению, они еще не использовались для прогнозов, которые были бы подвергнуты независимым и критическим испытаниям.

Это означает, что большую часть материала из литературных источников следует оценивать с позиций чисто статистической значимости наблюдаемых циклов или корреляций. И снова, к сожалению, приходится отметить тот факт, что статистические исследования значимости (если только доказательства не являются несомненными и подавляющими) сопровождаются предположениями, оговорками и неопределенностями, которые делают сомнительными такие выводы, основанные лишь на статистике. Достаточно рассмотреть проблемы, связанные с отбором данных (осознанным или неосознанным, в пространстве или во времени), автокорреляциями, сглаживаниями и апостериорными гипотезами, чтобы увидеть, что здесь существуют серьезные трудности.

3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Отдельные статистические методы сильно различаются по их способности идентифицировать повторные интервалы внутри некоторого набора данных и описывать свойства этого набора. Несомненно, что некоторые весьма совершенные современные методы, такие, как метод максимума энтропии [15] и нецелочисленный метод спектрального анализа [16], позволяют получить очень точное описание наборов данных. Однако имеется существенное различие между таким *описанием* и *прогнозом* свойств другого набора данных. Методы, дающие более детальное и точное описание какого-либо набора, не обязательно дают более реальный прогноз свойств другого набора (см., например, [17]).

Ряды климатических данных заведомо нестабильны с точки зрения их статистических характеристик, т. е. они не склонны к «хорошему поведению» и проявляют тенденцию к нестационарности. Классическим примером такой ситуации являются ряды данных об уровнях воды в озере Виктория в Восточной Африке. Брукс [18] в 1923 г. обнаружил заметную корреляцию этого ряда данных, которые регистрировались к тому времени около 20 лет, с солнечными пятнами. Несомненно, некоторые чувствительные современные методы отнесли бы значительную часть этой корреляции к 11-летней периодичности в этом ограниченном наборе данных. Однако к 1936 г. Уолкер [19] обнаружил нарушение этой периодичности и появление подобий второй гармонике. В 1961—1964 гг. очень сильные дожди привели к подъему уровня озера на величину, примерно вдвое большую, чем амплитуда ранее обнаруженных колебаний [20], но только

с более медленным последующим спадом [21]. Кроме того, имеются историческое свидетельство об очень высоких уровнях воды в этом озере в конце XIX столетия [22] и другие заметные отклонения, зарегистрированные в древности [23].

Работа Белла [24] наглядно демонстрирует, насколько опасно считать, что корреляции, которые могут проявляться как весьма значимые в течение коротких промежутков времени, будут столь же устойчивыми в течение более длительных временных интервалов. Белл рассчитал коэффициенты корреляции по скользящим 15-летним интервалам между различными климатическими временными рядами и солнечными пятнами и обнаружил отклонения в диапазоне от +0,5 до -0,5 для различных временных интервалов. Этот результат в значительной степени объясняет противоречия между картой разностей поверхностного давления в периоды от максимума до минимума солнечных пятен, полученной Векслером [25], и такой же картой Баура [26] и ставит под сомнение значимость этих результатов, так же как результатов Джаганнатана и Бхэлма [27] для дождей в Индии.

Эта проблема частично преодолима при соответствующем допущении об автокорреляциях в каждом из рядов данных, если использовать формулу Куэновилла [28] для уменьшения числа независимых наблюдений (например, [29]). Однако в связи с тем, что автокорреляционные функции сами оказываются не очень стабильными, этот подход не решает проблему полностью.

Эмпирический отбор какого-либо ряда данных, характеризующегося наличием статистически значимых корреляций или периодичностей, из существенно большего объема данных, не обнаруживающих этих свойств,— другая крупная проблема в интерпретации результатов. Можно ожидать, что пять наборов данных в каждой сотне независимых наборов покажут любую заданную корреляцию или периодичность при 95 %-ном доверительном уровне чисто случайно. Бывает, что такой искусственный отбор данных совершают бессознательно и выбирают для исследования некоторую область, переменную величину или эпоху, руководствуясь просто «предчувствием», что данную область выгодно исследовать. Такая процедура может быть и осознанной, но только неявно выраженной. Примером тому является анализ Бхэлмом [30] данных по Раджастану в Индии. Он выбрал площадь, отнесенную Джаганнатаном и Бхэлмом [27] к «значимым» при их анализе территории всей Индии. В статье [27] фактически проанализированы данные о дождях со 105 станций; при этом сначала временные ряды на каждой станции разбивались на шесть параметров сезонного распределения, а затем получившиеся 630 наборов переменных обрабатывались с помощью спектрального анализа. Джаганнатан и

Бхэлм обнаружили 26 случаев, в которых 11-летняя периодичность была значимой при 95 %-ном доверительном уровне. Таким образом, 1 из 24 случаев был «значимым», тогда как аналогичную картину можно ожидать в одном из 20 случаев чисто случайно. Подобной же критике следует подвергнуть результаты анализов поверхностного давления Паркера [31], который обнаружил значимые эффекты именно в тех пропорциях на всей площади, которые можно ожидать случайно.

Искусственный отбор данных является очевидным во внешне впечатляющей статье Ксантакиса [32], который обнаружил на первый взгляд высоко значимые коэффициенты корреляций между рядами «среднезональных годовых осадков» в северном полушарии и индексом солнечной активности. Изучение источника данных, использованного Ксантакисом, показало, что в зоне между 70 и 80° с. ш. он не включил полный набор данных с 1912 по 1924 г. с одной станции, и поэтому его «зональное среднее» с 1912 по 1921 г. базировалось лишь на данных одной-единственной станции. В интервале 1951—1960 гг. Ксантакис использовал в каждый год данные лишь 6—7 станций и не включил пять остальных станций. Между кривой Ксантакиса и кривой, в которой использованы все данные, имеется хорошее согласие в области центрального солнечного максимума в 1938 г., но оно непрерывно ухудшается по мере приближения к началу или концу диапазона регистрации в соответствии с возрастающей пропорцией количества опущенных данных [8].

Статья Кинга [3] содержит ряд выразительных кривых, которые показывают данные в благоприятно отобранных интервалах и которые в большинстве своем весьма сглажены (что улучшает очевидные корреляции способом, сходным с автокорреляцией). Например, рис. 3 у Кинга дает информацию о выпадении дождей в Форталезе в Бразилии, но в нем использована только наиболее благоприятная половина данных, приведенных Маркхэмом [33]. Кривая Кинга для температур центральной Англии в июле основана на данных с 1750 по 1880 г., несмотря на наличие рядов с 1659 по 1973 г. [34], а кривая по числу отловов белых медведей в юго-западной Гренландии включает только наиболее убедительную половину кривой Вайба [35]. Мейсон [36] и Фолленд [37] указали на то, что корреляция Кинга [38] 11-летнего солнечного цикла с урожаями картофеля в Англии относится к периоду с 1935 по 1959 г. и не содержит сведений из более длительного периода с 1890 по 1935 г.

Когда данные не удовлетворяют простым гипотезам, пытаются выработать гипотезу, которой соответствовали бы имеющиеся данные. Так, изменения во времени или от станции к станции знака предположительно значимых корреляций климатических параметров с числом солнечных пятен привели не-

скольких авторов к предположению о том, что эффект солнечных пятен становится обратным, когда достигается некоторое критическое значение их числа [32, 39—41]. Обоснованность такой выработанной к случаю гипотезы необходимо проверить на независимых данных. Белл [24] указывает, что самые последние данные не подтверждают гипотезу Лоуренса [39].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Обзор литературы по вариациям атмосферного давления в течение солнечных циклов [25, 26, 31, 42—44] показывает, что многие обнаруженные вариации взаимно противоречивы и в целом не значимы, если принимать во внимание автокорреляции и пространственный отбор. Как свидетельствует Белл [24], результаты зависят от того, какие именно циклы солнечных пятен включены в анализ.

Недавно проведенные всесторонние исследования вариаций температуры у поверхности земли, в частности исследование Герети и др. [45], не показали никаких значительных изменений в течение солнечных циклов, за исключением местных или региональных исследований Мейсона [36], Мокка, Хиблера [17] и Керри [46], использовавших метод максимума энтропии. Прогностическое значение этих последних результатов сомнительно.

Несколько тщательных исследований данных об осадках (в частности, [47, 48, 45]) дали негативные результаты. Исключениями являются исследования Джаганнатана и Бхэлма [27] и Ксантакиса [32], в которых подчеркивается значимость результатов. В первом из них результаты для Индии не являются значимыми, если надлежащим образом учесть эмпирический отбор данных, тогда как вывод Ксантакиса не подтверждается при подключении всех данных. Серия статей Дайера и др. [49—52] по выпадениям дождей в Южной Африке не основана на достаточно длительной регистрации данных и поэтому не может служить сколько-нибудь обоснованной базой для прогноза, тем более что доказательства более ранних колебаний в других местностях, упомянутые Дайером и Тайсоном [52], еще раз демонстрируют, что недавно замеченные колебания могут являться недолговечными случайными событиями.

Утверждаемые корреляции между грозовой активностью и циклами солнечных пятен обычно противоречивы или малы и не являются значительными. Заметная корреляция с коэффициентом $+0,88$, найденная Септером [59] и Бруксом [53] для Сибири, оказалась ложной [54].

Корреляции содержания O_3 с солнечными циклами остаются спорными. Наиболее всесторонний последний анализ Анджелла и Коршовера [60] показывает, что глобальные изменения в со-

держании O_3 в связи с изменениями солнечной активности «не вполне значимы». Анализ Хилла и Шелдона [61] данных о полном содержании озона в Арозе (1932—1974 гг.), который, как привыкли считать, имеет составляющую солнечного цикла, показал различную периодичность для рядов O_3 и солнечных пятен, а при взаимной корреляции этих двух рядов наблюдается «отсутствие значимого соотношения в запаздывании фаз между ними».

Утверждения о корреляциях числа солнечных пятен с высотой тропопаузы бывают основаны на неадекватных данных или взаимно противоречивыми [41, 62, 63].

Утверждение о корреляциях других климатических переменных величин с циклами солнечных пятен равно неубедительно, о чем свидетельствуют всесторонние исследования речного стока [47], рядов данных о годовых кольцах деревьев [64] и годовых донных отложениях [9, 65], дающие отрицательные результаты. Последние и еще не опубликованные результаты Митчелла и Стоктона, относящиеся к региональному индексу засух и базирующиеся на данных о годовых кольцах деревьев на западе США, могут иметь некоторое региональное значение, но ограниченное (в лучшем случае) прогностическое. Эта работа среди других по данному вопросу наиболее тщательная и убедительная.

Применимость к более длительным (т. е. климатическим) масштабам времени, очевидно значимых короткопериодных корреляций между метеорологическими показателями и прохождением секторных границ солнечного магнитного поля [66—68], еще нужно установить.

5. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Таким образом, представляется, что в настоящее время, несмотря на обширную литературу по рассматриваемому вопросу, мало или даже нет убедительных доказательств статистической значимости или практической полезности корреляций между циклами солнечных пятен и погодой в климатических масштабах времени. Имеющиеся данные показывают, что если в будущем большим количеством данных или лучшим анализом удастся выявить статистически значимые соотношения, то они объяснят настолько мало из совокупности изменений в климатических данных, что будут иметь малое практическое значение.

Такого вывода можно было бы избежать, если бы существовала более сложная гипотеза, способная более тонко учесть большую часть таких изменений. Однако такая гипотеза не будет сразу принята как жизнеспособная теория; сначала она

должна использоваться для получения детальных прогнозов, которые будут проверяться на независимых данных.

Эти выводы, совпадая с выводами авторов наиболее объективных обзоров (таких, как Такер [5] и Медоуз [6]), резко противоречат мнению Кинга [3]. Кроме того, частота, с которой ошибки, заблуждения и отклонения появляются в литературе, оправдывает крайне критическую позицию, занятую Мониним [1], когда он писал об «удачных экспериментах самовнушения» и в равной степени критические замечания С. П. Хромова [69].

Сэр Дж. Уолкер писал в 1946 г.: «Я полагаю, что после долгих веков веры в контроль над нашей деятельностью со стороны небесных тел человек инстинктивно верит в существование неких периодов в погоде. Я потерял свою веру, когда настоятельная необходимость в достоверности сезонных прогнозов заставила меня оценивать результаты, получаемые стандартными методами, с помощью не инстинкта, а обоснованных количественных критериев [70]».

Возможно, сказанное скорее относится к установленной структуре, в которой протекает научная деятельность. Во многих странах перед учеными во всех областях знаний ставится задача поддерживать на определенном уровне число публикаций и стараться направлять свою деятельность на пользу общества в целом; действительно, оказываемая им персональная и профессиональная поддержка зависят от этих факторов.

Такая ситуация может приводить к публикации в угоду не имеющей глубоких научных знаний и доверчивой публике работ, не доведенных до конца или содержащих нестрогие и преувеличенные утверждения и выводы. Это в наибольшей мере относится к тем областям, которые интересуют все общество, таким как долговременное прогнозирование погоды или климата. Вероятно, это относится и к другим сферам большой социальной, экономической и политической значимости — общественным наукам, экономике и наукам об окружающей среде.

Недавно Гоулд [71] в своей интересной и глубокой статье, где заново анализируются данные известного специалиста XIX в. по физической антропологии С. Г. Мортон, отметил, что «неосознанные и туманно осознанные подтасовка, подделка и манипуляция (данными) весьма распространены, эндемичны и неизбежны в профессиях, в которых присуждают степень и положение за ясное и недвусмысленное открытие. Получается нечто среднее между неосознанной пристрастностью и более осознанной манипуляцией в интересах истины, горячо признаваемой, но непропорционально твердо поддерживаемой». Гоулд говорит далее, что он выдвигает этот спорный вопрос, «надеясь на улучшение положения двумя путями: во-первых, зная о существовании такого недостатка, мы более внимательно посмотрим на

нашу собственную деятельность, а во-вторых, мы можем выработать привычку, как это делал Мортон, представлять беспристрастно всю нашу информацию и способы ее получения так, чтобы другие могли оценить и увидеть то, что мы, при нашей слепоте, не можем».

Именно в свете всего этого я предлагаю некоторые простые качественные правила, которые могут оказаться полезными в качестве руководства авторам, редакторам, рецензентам и читателям научных статей в этой дискуссионной области солнечно-земных связей. Я предлагаю следующее:

а) учитывать все свойства данных — их погрешности, отклонения, рассеяния, автокорреляцию, пространственную взаимосвязанность, частотное распределение и условие стационарности;

б) выбирать статистические методы соответственно как свойствам данных, так и целям анализа (например, для описания или для прогноза);

в) критически анализировать статистическую значимость результата, надлежащим образом принимая во внимание пространственную взаимосвязанность, автокорреляции и сглаживания, а также искусственный отбор данных;

г) проверять полученный результат на одном или более независимых наборах данных или на подмножествах первичных данных;

д) стараться выводить физические гипотезы, которые можно проверить на независимых наборах данных, предпочтительнее на некоторых других звеньях в гипотетической причинно-следственной цепи;

е) оценивать практическое значение результата, например ту долю общей изменчивости, которую можно предсказать или «объяснить»;

ж) подробно описывать свойства и ограничения данных, используемые статистические методы (включая отбор и сглаживание данных) и любые допущения, оговорки и сомнения;

з) не преувеличивать статистическое и практическое значение результата.

Такие основные правила некоторым могут показаться советом к совершенствованию, но они, несомненно, прояснят многое в путанице и полемике, которые в настоящее время окружают проблему солнечно-погодных связей.

Прогресс в этой области в самом деле еще возможен, по крайней мере можно лучше понять, как работает атмосфера. Однако к утверждениям о том, что влияние солнечной активности на погоду может образовать полезную основу для климатического прогноза, как исследователи, так и потребители в настоящее время должны относиться с большим скептицизмом.

Однако хочется подчеркнуть, что настоящий весьма критический обзор ограничивается работами по связям с 11- и 22-летним циклами солнечных пятен. В целом мое мнение таково, что, хотя в большей части литературы по короткопериодным солнечно-погодным соотношениям, по-видимому, приводятся также ошибочные результаты, имеется несколько хорошо обоснованных статей, которые устанавливают заслуживающие доверия соотношения во временном масштабе один-два дня (в частности, [66—68]). Это частично обусловлено относительно гораздо большим количеством имеющихся данных по этим более коротким временным интервалам, что обеспечивает гораздо более надежную статистику. Действительно, в этих масштабах времени существенно легче накапливать независимые наборы данных, с помощью которых подвергать испытанию механизмы явлений и прогнозы.

Есть и другая причина того, почему ожидаемый заметный прогресс вероятнее в этих более коротких масштабах времени. Дело в том, что климатическая система восстанавливается от достаточно больших кратковременных возмущений в глобальном энергетическом балансе (т. е. гасит эти возмущения) обычно за дни или недели. Например, громадные снежные бури, пронесшиеся через Северную Америку, часто приводят к значительному повышению альбедо на огромных площадях, ввиду чего ощутимая часть приходящего солнечного излучения отражается обратно. На смену таким бурям, приводящим посредством механизма «снежного блеска» [72] (положительная обратная связь) к некоторому «ледниковому периоду», приходит отрицательная обратная связь, и климатическая система быстро возвращается в свое среднее состояние.

Таким же путем существенно меньшие энергетические возмущения солнечного происхождения могут приводить к заметным кратковременным атмосферным эффектам, но эти эффекты должны быстро погаситься. Если такие кратковременные эффекты солнечного происхождения удастся понять и прогнозировать, это повысит возможность значительных улучшений в краткосрочных прогнозах погоды, хотя при этом значительных эффектов в долговременных масштабах может и не быть.

Литература

1. Монин А. С. Прогноз погоды как задача физики.— М.: Наука, 1969.
2. Lesik B. Appendix I in J. M. Wilcox. *J. Atmos. Terrest. Physics*, 37, 237, 1975.
3. King J. W. *Astronaut. Aeronaut.*, 13, 10, 1975.
4. Shapley A. H., Kroehl H. W., Allen H. W. *Solar-Terrestrial Physics and Meteorology: A Working Document. Spec. Comm. for Solar-Terr. Phys., Nat. Acad. Sci., Wash. D. C., 1975.*

5. Tucker G. B. *Weather*, **19**, 302, 1964.
6. Meadows A. J. *Nature*, **256**, 95, 1975.
7. Gani J. *Search*, **6**, 504, 1975.
8. Pittock A. B. *Rev. Geophys. and Space Phys.*, August, 1978 (in press).
9. Monin A. S., Vulis I. L. *Tellus*, **23**, 337, 1971.
10. Kutzbach J. E., Bryson R. A. J. *Atmos. Sci.*, **31**, 1958, 1974.
11. Mitchell J. M., Jr. *Quaternary Res.* **6**, 481, 1976.
12. Pittock A. B. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **103**, 575, 1977.
13. Smith E. V. P., Gottlieb D. M. *Space Sci. Rev.*, **16**, 771, 1974.
14. White O. R. (ed.). *The Solar Output and Its Variation*, Colo. Assoc. Uni. Press. Boulder, 1977.
15. Burg J. P. *Geophysics*, **37**, 375, 1972.
16. Schickedanz P. T., Bowen E. G. J. *Appl. Meteorol.*, **16**, 359, 1977.
17. Mock S. J., Hibler W. D. III. *Nature*, **261**, 484, 1976.
18. Brooks C. E. P. *Geophys. Mem. London*, **2** (20), 337, 1923.
19. Walker G. T. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **62**, 451, 1936.
20. Lamb H. H. *Geogr. J.*, **132**, 183, 1966.
21. Rodhe H., Virji H. *Mon. Weather Rev.*, **104**, 307, 1976.
22. Ravenstein E. G. *Geogr. J.*, **18**, 403, 1901.
23. Fairbridge R. W. *Quaternary Res.*, **6**, 529, 1976.
24. Bell G. J. *Weather*, **32**, 26, 1977.
25. Wexler H. *Tellus*, **8**, 480, 1956.
26. Baur F. *Physikalische-Statistische Regeln als Grundlagen für Wetter und Witterungs Vorhersagen*, p. 125, Akad. Verlag, Frankfurt am Main, W. Germany, 1958.
27. Jagannathan P., Bhalme H. N. *Mon. Weather Rev.*, **101**, 691, 1973.
28. Quenouille M. H. *Associated Measurements*, Butterworth, London, 1952.
29. Troup A. J. *Geofis Pura Appl.*, **51**, 184, 1962.
30. Bhalme H. N. *Indian J. Meteorol. Hydrol. Geophys.*, **26**, 57, 1975.
31. Parker B. N. *Meteorol. Mag.*, **105**, 33, 1976.
32. Xanthakis J. In *Solar Activity and Related Interplanetary and Terrestrial Phenomena*, ed. by J. Xanthakis, Springer, N. Y., 1973.
33. Markham C. G. J. *Applied Meteorol.*, **13**, 196, 1974.
34. Manley G. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **100**, 389, 1974.
35. Vibe C. *The Danish Zoological Investigations in Greenland*, Bd. 170, Nr. 5, C. A. Reitzels Forlag, Copenhagen, 1967.
36. Mason B. J. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **102**, 473, 1976.
37. Folland C. K. *Weather*, **32**, 336, 1977.
38. King J. W. *Nature*, **245**, 443, 1973.
39. Lawrence E. N. *Weather*, **20**, 334, 1965.
40. Suda T. *Geophys. Mag. (Tokyo)*, **31**, 515, 1963.
41. Suda T. *Geophys. Mag. (Tokyo)*, **37**, 361, 1976.
42. Willett H. C. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **95**, 89, 1961.
43. Максимов И. В., Сленков Б. А. *Доклады АН СССР*, **201**, 339, 1971.
44. Miles M. K. *Meteorol. Mag.*, **103**, 93, 1974.
45. Gerety E. J., Wallace J. M., Zerefos C. S. J. *Atmos. Sci.*, **34**, 673, 1977.
46. Currie R. G. J. *Geophys. Res.*, **79**, 5657, 1974.
47. Rodriguez-Iturbe I., Yevjevich V. *Hydrol. Papers*, **26**, Col. State Univ., Fort Collins, 1968.
48. Dehsara M., Cehak K. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklim. Ser. B*, **18**, 269, 1970.
49. Tyson P. D. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, **61**, 711, 1971.
50. Tyson P. D., Dyer T. G. J., Mametse M. N. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **101**, 817, 1975.
51. Dyer T. G. J. S. *Afr. J. Sci.*, **71**, 369, 1975.
52. Dyer T. G. J., Tyson P. D. J. *App. Meteorol.*, **16**, 145, 1977.
53. Brooks C. E. P. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **60**, 153, 1934.

54. Клейменова З. П. Метеорология и гидрология, № 8, 64—68, 1967.
55. Павлова Г. Р. Труды ГГО, 242, 118—124, 1969.
56. Markson R. Pure Appl. Geophys., 84, 161, 1971.
57. Fischer H. J., Muhleisen R. Meteorol. Rundsch., 25, 6, 1972.
58. Stringfellow M. F. Nature, 249, 332, 1974.
59. Septer E. Meteorol. Z., 43, 229, 1926.
60. Angell J. K., Korshover J. Mon. Weather Rev., 104, 63, 1976.
61. Hill W. J., Sheldon P. N. Geophys. Res. Letters, 2, 541, 1975.
62. Rasool S. I. Geofis. Pura Appl., 48, 93, 1961.
63. Cole H. P. J. Atmos. Sci., 32, 998, 1975.
64. LaMarche V. C., Jr., Fritts H. C. Tree Ring Bull., 32, 19, 1972.
65. Bryson R. A., Dutton J. A. Ann. N. Y. Acad. Sci., 95, 580, 1961.
66. Wilcox J. M., J. Atmos. Terr. Phys., 37, 237, 1975.
67. Wilcox J. M., Svalgaard L., Scherrer P. H. J. Atmos. Sci., 33, 1113, 1976.
68. Hines C. O., Halevy I. J. Atmos. Sci., 34, 382, 1977.
69. Хромов С. П. Метеорология и гидрология, № 9, 93—110, 1973.
70. Walker G. T. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 72, 282, 1946.
71. Gould S. J. Science, 200, 503, 1978.
72. Flohn H. Quaternary Res., 4, 385, 1974.

ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ, СОЛНЕЧНЫЕ ПЯТНА И КЛИМАТ

Х. Т. Мёрс, Л. Шламмингер

В последнее время предпринимались попытки связать возникновение солнечных пятен с гравитационным притяжением или движением Солнца по орбите, но они не дали положительных результатов. В этой статье рассмотрены изменения орбитальных моментов импульса планет вследствие гравитационных возмущений. В Солнечной системе 98 % момента импульса приходится на долю орбитального движения четырех планет-гигантов: Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Исследуется потенциальная возможность влияния движения этих планет на изменение числа солнечных пятен. Возмущающие силы между двумя отдельными планетами периодически изменяются в течение их синодического периода и симметричны относительно гелиоцентрических соединений и противостояний. Средние периоды движений отдельных пар и групп планет-гигантов в высокой степени соизмеримы. Их синодические полупериоды соответствуют некоторым основным частотам изменения числа солнечных пятен. В частности, 10-летний период может быть отождествлен с относительным движением пары Юпитер—Сатурн, 90-летний — с движением пары Уран—Нептун, а 11-летний период — с движением пары Юпитер—Сатурн относительно пары Уран—Нептун. Физически связь между движением планет и солнечными пятнами осуществляется, по-видимому, посредством передачи момента импульса от Солнца к периферийным областям Солнечной системы. Мы предполагаем, что существует некоторый основной поток энергии, направленный от Солнца, причем на него влияет ускорение внешних планет вследствие гравитационного возмущения со стороны внутренних планет, ритмично модулированного за счет изменения конфигурации всей планетной системы. Предполагается, что в Солнечной системе передача момента сил тяготения вызывает изменения как глобального, так и локального характера в картине вихревых систем сред с малой инерционностью, таких как солнечная фотосфера или земная атмосфера. Так возникает механизм, при помощи кото-

Н. Т. Mörth. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, NR47TJ, United Kingdom.

Л. Schlamming. F. S. Astronomical Observatory, Erlangen, Federal Republic of Germany.

рого силы, внешние по отношению к Земле, могут влиять на климат и характер циркуляции земной атмосферы — или непосредственно, или посредством модуляции солнечной активности.

Со времени первых (в начале XVII в.) наблюдений Шейнером и Галилеем солнечных пятен с помощью телескопа рассматривалась возможность влияния движений планет на изменения внешнего вида фотосферы. На эту тему написано большое число статей (избранные ссылки прилагаются в конце библиографии). Некоторые исследователи пытались объяснить периодичность в появлении солнечных пятен силами гравитационного притяжения, создаваемыми совместно всеми планетами на поверхности Солнца. Такой подход сопряжен с трудностями, поскольку периодичность движения «приливообразующих» планет — Меркурия, Венеры, Земли и Юпитера — не соответствует периодичности солнечных пятен. Смит и Эдди [1] отмечают, что даже в редком случае соединения девяти планет сила, вызывающая прилив, составляет всего лишь 10^{-12} от солнечного тяготения, поэтому маловероятно, чтобы планетарные приливы были фактором, определяющим движения на поверхности Солнца. Другие исследователи рассматривали орбитальное движение Солнца относительно центра тяжести Солнечной системы. В изменениях момента импульса при движении Солнца действительно проявляются периоды, равные 22 и 179 лет. Однако движение Солнца под воздействием сил тяготения является регулярным, и поэтому здесь не остается возможности объяснить значительные вариации амплитуды и скачки фазы на кривой числа солнечных пятен.

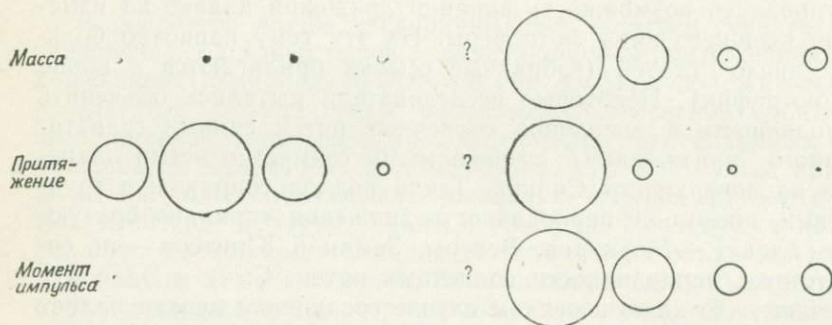
В нашем приближении мы рассматриваем не приливные эффекты за счет сил гравитационного притяжения, а только роль этих сил в переносе момента импульса в Солнечной системе. Из рис. 1, где сравниваются массы, силы притяжения на поверхности Солнца и орбитальные моменты импульса для различных планет, видно, что основная доля момента импульса в Солнечной системе заключена в движении четырех планет-гигантов: Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Поэтому мы сосредоточим внимание на анализе движения этих четырех планет и отождествлении тех вариаций, которые кажутся важными в отношении солнечных пятен.

Пусть i и o — две планеты с периодами орбитального движения P_i и P_o , причем P_i всегда меньше P_o . Тогда относительные положения двух планет (соединения, противостояния или любые другие) повторяются через взаимный синодический пе-

риод $P_{i0} = P_i \cdot P_0 / (P_0 - P_i)$. Синодические периоды для различных комбинаций пар планет-гигантов таковы:

Пара	Символ	Синодический период
Юпитер—Сатурн	5—6	19,85 а
Сатурн—Уран	6—7	45,36 а
Уран—Нептун	7—8	171,39 а

(а—тропический год)



	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Астероиды	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
Номер	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Масса	0,055	0,817	1,000	0,108	?	318,4	95,2	15,0	17,2	0,8
Сила притяжения	0,95	2,16	1,00	0,03	?	2,26	0,11	<0,01	<0,01	<0,01
Момент импульса	0,03	0,69	1,00	0,13	?	726,6	293,7	65,7	94,8	5,0

Рис. 1. Некоторые сравнительные характеристики Солнечной системы.

Изучение закономерностей орбитальных движений планет и спутников показывает, что отношение средних орбитальных периодов некоторых пар тел в Солнечной системе близко к отношению двух небольших целых чисел. Степень «соизмеримости» обычно определяется выражением $\epsilon = P_i/P_0 - I/J$, где I и J — небольшие целые числа. Следует условиться, что означает выражение «небольшой». В наших вычислениях мы ограничимся значениями I и J , не превышающими 9. Если не наложить это ограничение, то всегда можно найти два таких целых числа, отношение которых приближается к P_i/P_0 с любой степенью точности. Мы вычислили ϵ для всех пар планетных тел Солнечной

системы. Относительно высокую соизмеримость ($|\varepsilon| < 0,01$) имеют следующие пары тел:

Пара	Символ	I/J	ε
Меркурий—Венера	0—1	2:5	-0,0085
Меркурий—Земля	0—2	1:4	-0,0092
Меркурий—Марс	0—3	1:8	+0,0030
Венера—Земля	1—2	5:8	+0,0098
Венера—Марс	1—3	1:3	-0,0063
Венера—Церера	1—4	1:8	+0,0086
Марс—Церера	3—4	2:5	+0,0085
Марс—Юпитер	3—5	1:6	-0,0081
Юпитер—Сатурн	5—6	2:5	+0,0026
Юпитер—Уран	5—7	1:7	-0,0016
Сатурн—Плутон	6—9	1:9	+0,0074
Уран—Нептун	7—8	1:2	+0,0098
Уран—Плутон	7—9	1:3	-0,0049
Нептун—Плутон	8—9	2:3	+0,0033

Рой и Овенден [2] показали, что соизмеримость средних движений в Солнечной системе встречается чаще, чем можно было бы ожидать исходя из предположения о случайности этого явления.

Сформируем теперь пары из планет на соседних орбитах. Критерием для этого служит наибольшая возможная соизмеримость в парах. Две возможные группы пар и соответствующие им значения ε таковы:

Пара	0—1	2—3	4—5	6—7	8—9
$\varepsilon, 10^{-3}$	8,5	23,9	11,8	17,3	3,3

Пара	0	1—2	3—4	5—6	7—8	9
$\varepsilon, 10^{-3}$		9,8	8,5	2,6	9,8	

Таким образом, мы выбираем вторую группу. Синодические периоды и значения ε у этих пар следующие:

Пара	Синодический период	I/J	$\varepsilon, 10^{-3}$
1—2	1,60 а	5:8	9,8
3—4	3,18 а	2:5	8,5
5—6	19,86 а	2:5	2,6
7—8	171,39 а	1:2	9,8

Далее будем рассматривать каждую пару как индивидуальную систему и сформируем пары из соседних систем:

12—34 34—56 56—78

Их синодические периоды и значения ε составляют:

Пара	Синодический период	I/J	$\varepsilon, 10^{-3}$
12—34	3,22 а	1:2	2,7
34—56	3,79 а	1:6	6,5
56—78	22,46 а	1:9	4,8

Наконец, формируем пару из четверок:

1234—5678

Для четверок обнаруживается почти полная соизмеримость:

Пара	Синодический период	I/J	$\epsilon, 10^{-3}$
1234—5678	3,75 а	1:7	0,3

Эти результаты свидетельствуют о существовании жесткого контроля над относительным движением планет в Солнечной системе, который, возможно, вызван гравитационным взаимодействием.

Рассмотрим возможный механизм подобного взаимодействия между двумя планетами. Их среднее движение соответствует модели двух точечных масс, движущихся под воздействием центральной силы притяжения третьей, много большей массы (Солнца). Каждая планета возмущает движение другой не столько за счет своего собственного гравитационного взаимодействия с ней, сколько за счет возникающих возмущений притяжения Солнца и других планет. Величина этих возмущений растет с массой возмущающей планеты и периодически изменяется в зависимости от взаимного расположения этих двух планет. Возмущающую силу можно разложить на две компоненты: радиальную (направленную к Солнцу) и поперечную, перпендикулярную к радиальной (и почти касательную к орбите, поскольку эксцентриситеты планетных орбит относительно невелики). Действие поперечной компоненты вызывает ускорение и замедление орбитальных скоростей планет в течение синодического периода. Направление этих изменений скоростей схематически иллюстрирует рис. 2. На рис. 2, А показано возмущающее действие внешней планеты на внутреннюю. Внутренняя планета замедляется, начиная от гелиоцентрического соединения вплоть до точки, равноудаленной от Солнца и от внешней планеты. Затем она ускоряется вплоть до точки противостояния, после этого снова замедляется до второй точки равноудаленности и, наконец, снова ускоряется к точке соединения. Возмущение движения внешних планет внутренними происходит двумя различными путями. Если расстояние от Солнца до внешней планеты больше удвоенного расстояния от Солнца до внутренней планеты или равно ему (рис. 2, Б), то существует только две нейтральные точки тангенциальной компоненты возмущающей силы: внешняя планета ускоряется от точки соединения к точке противостояния и замедляется от противостояния к соединению. Если же расстояние от Солнца до внешней планеты меньше, чем удвоенное расстояние от Солнца до внутренней планеты (рис. 2, В), то для силы, создающей ускорение вдоль орбиты, имеются четыре нейтральные точки. Внешняя

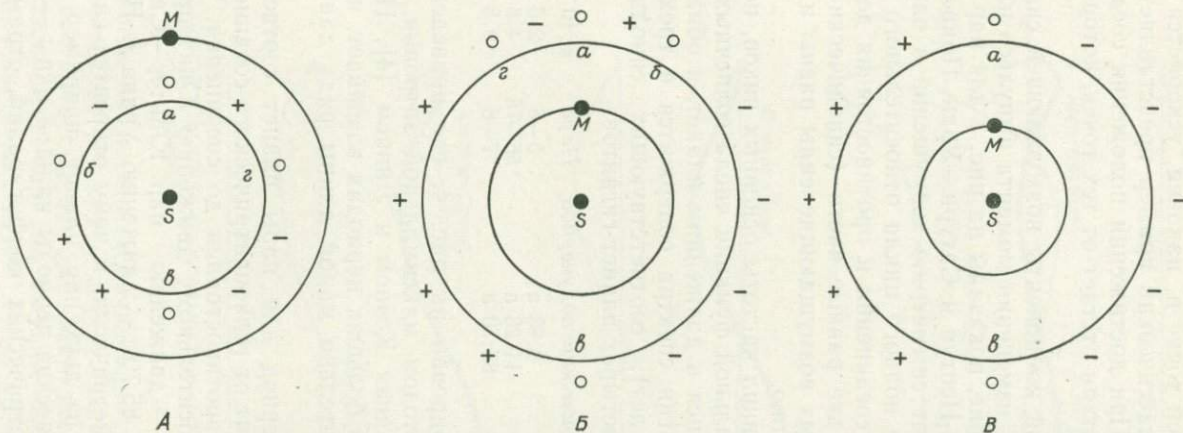


Рис. 2. Схема изменений поперечной компоненты возмущающей силы в течение синодического периода. Ускорение и замедление внешней планеты при возмущении ее движения относятся к взаимному движению планет (по часовой стрелке). Знаки на рисунке показывают изменение скорости движения по орбите относительно Солнца (против часовой стрелки). Движение испытывавшей возмущения планеты: «○» — без ускорения, «+» — ускорение, «-» — замедление. А — возмущено движение внутренней планеты; Б — возмущено движение внешней планеты, $2R_1 < R_0$; В — возмущено движение внешней планеты, $2R_1 \geq R_0$.

Обозначения: S — Солнце, M — возмущающая планета. Относительное положение планет: a — гелиоцентрическое соединение, б — первая точка равноудаленности, в — гелиоцентрическое противостояние, z — вторая точка равноудаленности.

планета замедляется от соединения до равноудаленной точки, затем ускоряется вплоть до противостояния, далее замедляется ко второй равноудаленной точке и, наконец, ускоряется вплоть до точки соединения. Классический пример представляет собой пара Юпитер—Сатурн. При достижении положения соединения Юпитер опережает, а Сатурн отстает от тех точек, которые следуют из закона Кеплера.

Изменения поперечной компоненты возмущающей силы, выраженные через скорость изменения момента импульса планеты, испытывающей возмущение, показаны на рис. 3 для пар планет Юпитер—Сатурн, Уран—Нептун и Сатурн—Уран. Приведенные диаграммы иллюстрируют симметрию возмущений в парах соседних планет в течение полного цикла относительного движения. Гелиоцентрические соединения и противостояния делят синодические периоды на две равные части (синодические полу-периоды), внутри которых возмущающие силы равны и противоположны по направлению.

Шламмингер [3] сравнил частоты основных пиков, полученных при анализе спектральной функции числа солнечных пятен, с периодами, относящимися к движениям планет, и обнаружил, что основная доля энергии спектра содержится в трех пиках (при 10, 11 и около 90 лет), соответствующих синодическим полупериодам в группе четырех планет-гигантов:

<i>Пик спектра</i>	<i>Синодический полупериод</i>	<i>Пара</i>	$\epsilon, 10^{-3}$
9,7—9,9 а	9,93 а	5—6	2,6
10,9—11,2 а	11,23 а	56—78	4,8
89,6—110 а	85,70 а	7—8	9,8

Этот вывод проиллюстрирован на рис. 4, где приведены два спектра, полученные методом максимальной энтропии, и коррелограмма, опубликованная Коэном и Линцем [4]. Несогласованность значений при больших периодах возникает, по-видимому, вследствие относительно малой длины ряда данных по солнечным пятнам.

Синодический полупериод для пары планет соответствует времени, которое проходит от гелиоцентрического соединения до противостояния или от противостояния до соединения. Период 9,93 а соответствует относительному движению Юпитера и Сатурна, период 11,23 а — движению пар Юпитер—Сатурн и Уран—Нептун и период 85,70 а — движению Урана и Нептуна. Трудно представить геометрически, к чему относится синодический период системы из двух пар планет, например 56—78. Индивидуальные синодические периоды каждой пары — это периоды повторения геометрических конфигураций, отрезки времени, которые проходят между двумя последовательными появлениями одного и того же значения гелиоцентрического угла,

разделяющего по долготе две планеты. Синодический период для системы из двух пар — это время, которое проходит между

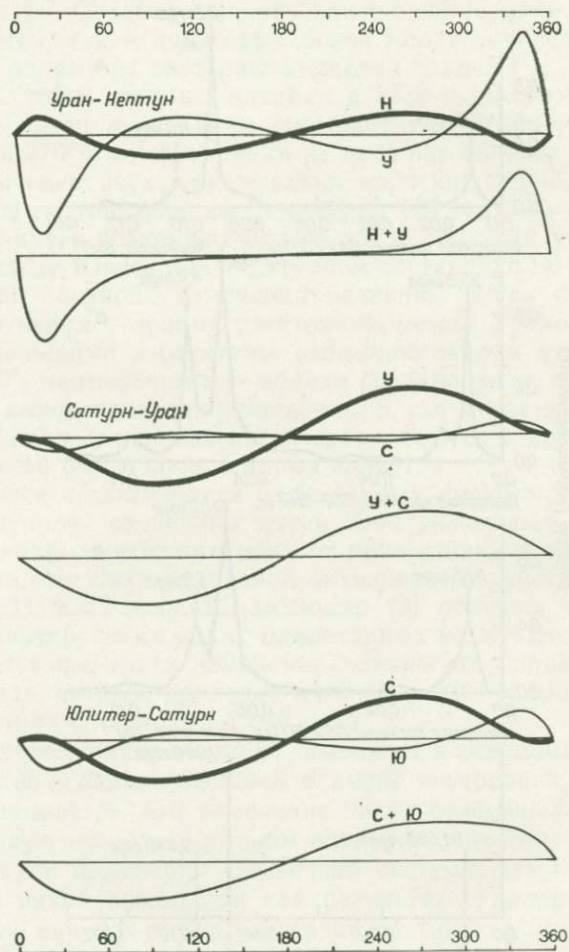


Рис. 3. Скорость изменения орбитального момента импульса при возмущении движения планет-гигантов.

двумя последовательными появлениями одного и того же углового расстояния в каждой паре планет. Для пары 56—78 этот период составляет 22,46 года. Если для представления «псевдосоединения» двух пар (не четырех «индивидуальных» планет) взять значение нуль, то 180° будет соответствовать «псевдопротивостоянию», а промежуток времени между ними — синодическому полупериоду (11,23 a) группы из двух пар.

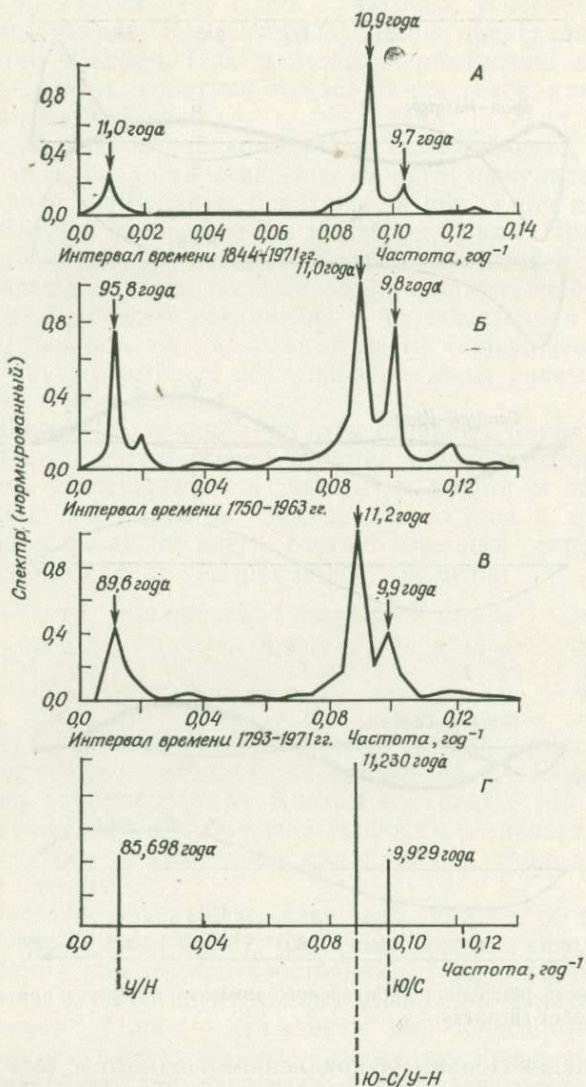


Рис. 4. Спектральная функция (А, Б), коррелограмма (В) относительного числа солнечных пятен и синодические полупериоды планет-гигантов (Г).

Мы показали, что частоты солнечных пятен сравнимы с частотами относительного движения четырех планет-гигантов. Сопоставим теперь число солнечных пятен с угловым расстоянием (рис. 5). Оказывается, что как основные пики числа солнечных пятен, так и некоторые более мелкие отклонения соответствуют одному из двух расположений планет:

1) для ряда данных начиная с 1730 г. максимумы числа солнечных пятен в основном соответствуют угловому расстоянию 90 или 270° в конфигурации из двух пар 56—78;

2) в течение двух относительно коротких периодов вблизи 1780 и 1950 гг. (разделенных примерно 170 годами) пики числа солнечных пятен возникают вскоре после того, как угловое расстояние между Юпитером и Сатурном составляло 90 и 270° .

Большой период изменения величины пиков оказывается соответствующим угловому расстоянию между Ураном и Нептуном; наибольшими амплитуды оказываются при угловом расстоянии 90° , наименьшими — вблизи соединения и противостояния. Этот вывод иллюстрируется рис. 6, где изменения пиковых значений числа солнечных пятен сравниваются с простой функцией углового расстояния в парах планет.

Для более поздней части ряда данных имеются наблюдения магнитных полей солнечных пятен. Они указывают на изменение полярности магнитного поля от пика к пику и дают основание считать, что цикл солнечной активности в действительности длится не 11, а 22 года. Шламмингер [3] отмечал, что изменения в результирующих силах планетарных возмущений действительно могут вызывать изменение полярности солнечного магнитного поля, которое приводит к колебаниям полярности в солнечных пятнах с периодом 22,46 года.

Угловое расстояние около 90° вызывает в каждой из пар максимальное возмущение внешней планеты внутренней. Таким образом, оказывается, что изменение числа солнечных пятен связано в первую очередь с ритмом возмущающих сил, направленных наружу к периферии Солнечной системы. На наш взгляд, солнечные пятна возникают как результат существования направленных наружу потоков энергии от Солнца, модулированных изменением относительного расположения планет. При угловом расстоянии между планетами 90° этот поток максимален, при 0 и 180° он заблокирован.

Согласно Сакураи [5], малому числу солнечных пятен соответствует относительно высокая скорость экваториального вращения Солнца. Это совместимо с тем, что когда поток энергии наружу заблокирован, возрастает момент импульса внешних экваториальных слоев Солнца. Как указано в работе Эдди и др. [6], скорость экваториального вращения Солнца в течение

минимума Маундера была в среднем выше, чем в настоящее время, на 4 % и более.

Одно из главных возражений против гипотезы о влиянии планет на цикл солнечных пятен было основано на том, что в течение минимума Маундера, хотя планеты двигались по ор-

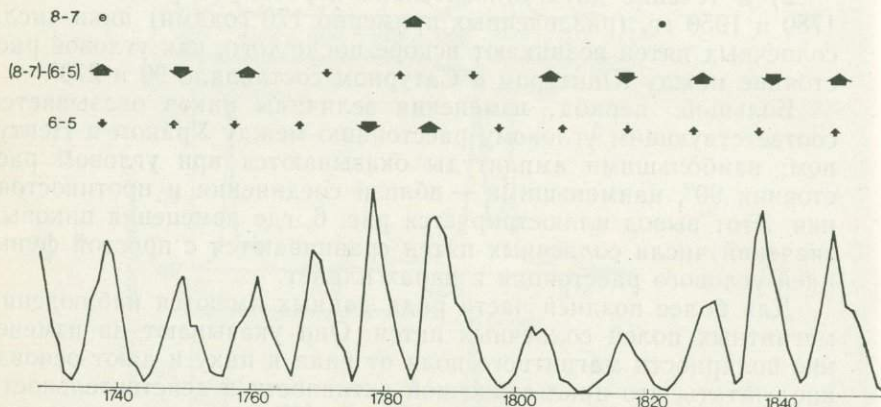


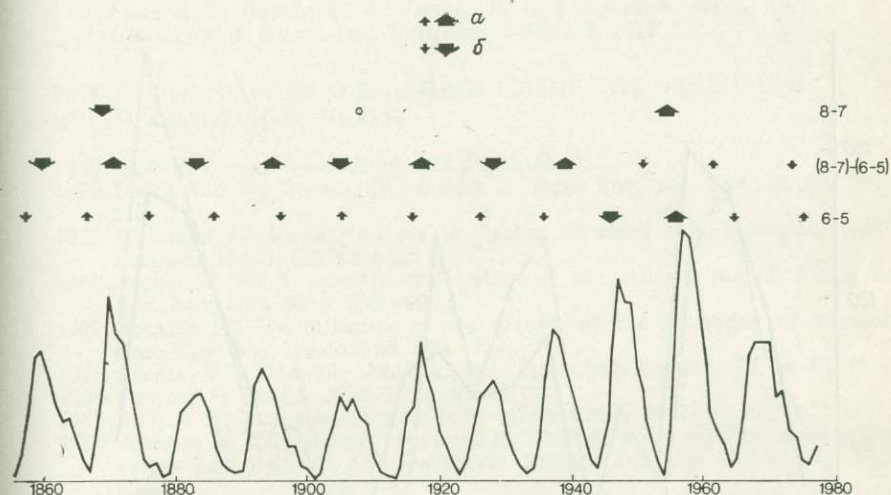
Рис. 5. Угловое расстояние для пар планет-гигантов и относительное число ренней и внешней планетами равно 90° , б — это расстояние равно 270° . Широкие

битам так же регулярно, как всегда, циклы солнечных пятен вообще не были заметны. Этот аргумент следует отвергнуть по двум причинам. Во-первых, Глейссберг [7] показал, что циклы солнечных пятен, хотя и сильно ослабленные, все же были различимы и в период минимума Маундера. Во-вторых, если движение планет оказывает только модулирующее воздействие на поток энергии от Солнца, а этот поток в течение минимума Маундера снизился, то продолжающееся обращение планет никак не могло повлиять на это снижение.

В рамках наших представлений невозможно детально рассмотреть различные вопросы взаимосвязи Солнца и погоды на Земле, по которым все накапливается огромное количество литературы. Мы хотим только указать на возможность применения изложенной здесь планетарной теории солнечных пятен к общей проблеме изменений погоды и климата.

Мы предполагаем, что периодически изменяющиеся потоки момента импульса возникают под воздействием планетарных

возмущений в Солнечной системе. Земля, как и любая другая планета, может участвовать в передаче и временном накоплении элементарных долей момента импульса в ритме, определяемом относительным положением соседних планет. Это может вызывать изменения орбитальной скорости и момента импульса



солнечных пятен в период 1730—1977 гг. а — угловое расстояние между внутренними планетами, б — это расстояние равно 270° . Широкие стрелки означают возможную связь с максимумом числа пятен.

собственного вращения планеты, ее спутников и колец (у Сатурна, Урана) или изменения в системах циркумполярных и локальных вихрей в океанах и атмосфере. Весьма возможно, что последние раньше всего откликаются на изменения потока от Солнца вследствие их относительно малой инерционности.

Кроме синодического периода, из относительного орбитального движения двух планет с приблизительно соизмеримыми средними движениями возникают еще две периодичности. Например, 13 периодов обращения Венеры приблизительно равны 8 периодам Земли, близкое прохождение планет происходит при каждом пятом соединении на одних и тех же участках орбит, вызывая резонансный эффект с периодом в 8,1 года. Поскольку кратность периодов не точная, последовательные резонансные положения медленно дрейфуют вдоль орбит; период дрейфа резонансов составляет 240 лет для системы Венера—Земля и около 2700 лет для системы Юпитер—Сатурн.

Периоды, возникающие вследствие взаимодействия Земли с соседними планетами, следующие:

Пара	Синодический	Резонансный	Дрейф резонансов
Венера—Земля	19,2 мес	8,1 лет	240 лет
Земля—Марс	25,6 мес	Нет	Нет

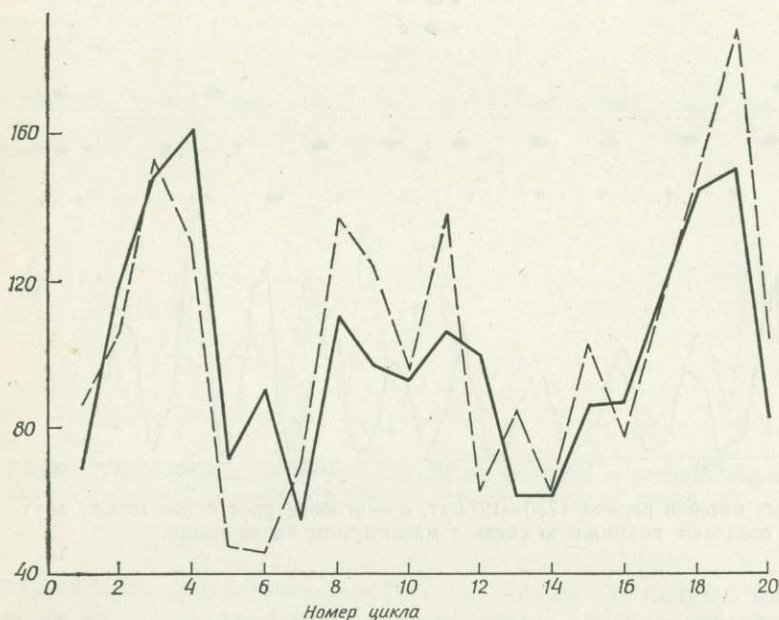


Рис. 6. Соотношение между числом пятен в моменты максимума солнечной активности и угловым расстоянием между парами планет Юпитер—Сатурн (5—6) и Уран—Нептун (7—8). Штриховыми линиями показано относительное число солнечных пятен, сплошными — величина $|L_8 - L_7| + |L_6 - L_5|$, где L — гелиоцентрическая долгота в момент максимума; $L = L - 90^\circ$ при $90^\circ \leq L \leq 180^\circ$.

Некоторые из них наблюдались в климатологических и геофизических данных.

Наличие наклона между орбитами планет создает у возмущающих сил малые компоненты, направленные под прямым углом к плоскостям орбит. Эти компоненты сил вызывают длиннопериодные вариации элементов орбит планет, известные в случае Земли как периоды Миланковича. Таким образом, возникает возможность воздействия вариации Миланковича на климат за счет гравитационного механизма.

Литература

1. *Smythe C. M., Eddy J. A.* Nature, **266**, 1977.
2. *Roy R. E., Ovenden M. W.* Mon. Not. Roy. Astr. Soc., **114**, 232, 1954.
3. *Schlamminger L.* Sunspot periods show a synchronization with the resonance periods and the perturbation periods of planets (unpublished), 1977.
4. *Cohen T. J., Lintz P. R.* Nature, **250**, 398, 1974.
5. *Sukurai K.* Nature, **269**, 402, 1977.
6. *Eddy J. A., Gilman P. A., Trotter D. E.* Solar Phys., **46**, 3, 1976.
7. *Glæssberg W.* Sterne und Weltraum, **7—8**, 229, 1977.

НЕКОТОРЫЕ РАБОТЫ О ВЛИЯНИИ ПЛАНЕТ НА ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

- 1859 *Wolf R.* Compt. Rend. Acad. Sci. Paris, **48**, 231.
- 1872 *De la Rue W., Stewart B., Loewy B.* Proc. Roy. Soc. London, **20**, 210—218.
- 1899 *Birkeland Kr.* Recherches sur les taches du soleil et leur origine; Skrift. Vidensk., Vol. 1, Christiania.
- 1900 *Brown E. W.* A possible explanation of the sunspot period. Mon. Not. Roy. Astr. Soc., **60**, p. 599—606.
- 1911 *Schuster A.* The influence of the planets on the formation of sunspots. Proc. Roy. Soc. London, **85**, 309—323.
- 1918 *Pocock R. J.* Monthly Notices, Roy. Astr. Soc. London, **79**, p. 54.
- 1936 *Sanford D.* Smiths. Misc. Coll., **95**, 11 pp.
- 1937 *Stetson H. T.* Sunspots and their effects. McGraw-Hill, 1937.
- 1946 *Johnson M.* Correlations of cycles in weather, solar activity, geomagnetic values and planetary configurations. Phillips and Van Orden, San Francisco.
- 1947 *Clayton H. H.* Solar cycles. Smiths. Misc. Coll., **106**, No. 22.
- 1954 *Anderson C. N.* Geophys. Res., **59**, 455.
- 1954 *Nelson J.* Transactions, Inst. Rad. Eng., CS-2, 19.
- 1962 *Suda T. J.* Met. Soc. Japan, **40**, 278.
- 1965 *Jose P.* Astron. Journ., **70**, 193—200.
- 1965 *Ward F. I.* Astrophys. Journ., **141**, 534.
- 1965 *Wood K. D., Wood R. M.* Nature, **208**, 129—131.
- 1966 *Trellis M.* CR Acad. Sci., B, **262**, 312.
- 1967 *Takahashi K.* Rad. Res. Lab., **14**, 237.
- 1967 *Bigg E. K.* Astr. Journal, **72**, 463—466.
- 1968 *Bollinger C. J.* Tellus XX, **3**, 412—416.
- 1969 *Nickel G. H.* Rep. Lawrence Radiation Lab., URCL-502264.
- 1970 *Bureau R. A., Craine L. B.* Nature, **228**, 984.
- 1972 *Wood K. D.* Nature, **240**, 91—93.
- 1972 *Sleeper H. P. Jr.* Planetary resonances, bistable oscillation modes and solar activity cycles. NASA Contractor Report 2035, prepared by Northrop Services Inc., Huntsville, Alabama.
- 1975 *Okal E., Anderson E. L.* Nature, **255**, 511.
- 1977 *Smythe C. M., Eddy J. A.* Nature, **266**, 435.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Г. У. Брайер

Описан новый метод выявления множественной периодичности временных рядов, когда на основе физических соображений можно предполагать наличие вынуждающих сил с возможными периодами p_1, p_2, \dots, p_n , причем сигналы могут не быть аддитивными, а также могут включать в себя эффекты взаимодействия или нелинейности. Применение этого метода для прогноза месячных значений относительного числа солнечных пятен (чисел Вольфа) показывает, что прогноз может быть выполнен с заблаговременностью до 100 месяцев, причем его среднеквадратичная ошибка сравнима с величинами, полученными ранее для прогнозов с заблаговременностью только в один или два года.

1. ТЕОРИЯ

Методы анализа Фурье широко используются, когда известно, что периодические воздействия могут влиять на физическую систему как вынуждающие силы. В этой статье представлен альтернативный метод анализа и прогноза временных рядов. Он применим в том случае, когда нужно выяснить существование множественной периодичности, если из физических соображений можно предполагать наличие периодических процессов с возможными периодами $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$, взаимодействующих сложным образом. В описанной здесь процедуре не делается никаких предположений относительно амплитуды, фазы или характера отклика системы на вынуждающие функции с периодами p_1, p_2, \dots, p_n . Однако считается, что эти периоды были определены априори на основе теоретического рассмотрения или предшествующей информации. Основная идея состоит в использовании разностных уравнений и методов фильтрации для проведения множественных оценок сигнала, содержащегося в наблюдении y_t в момент t , и для уменьшения шума ниже уровня, даваемого другими методами.

G. W. Brier. Atmospheric Science Department, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 80523 USA.

Рассмотрим сначала периодический сигнал с характерным временем повторения p_1 , свободный от шума. Тогда в момент t сигнал y_t определяется из прогностического уравнения

$$y_t = y_{t-l_1}, \quad (1)$$

где l_1 — запаздывание, равное периоду p_1 . Если существует дополнительный цикл длиной p_2 , то уравнение (1) будет ошибочным и легко показать, что правильным будет уравнение

$$y_t = y_{t-l_1} + y_{t-l_2} - y_{t-l_1-l_2}, \quad (2)$$

где l_2 — запаздывание, равное длине цикла p_2 .

Вообще говоря, если существует n циклов длиной p_1, p_2, \dots, p_n , то сигнал y_t ($1, 2, \dots, n$) должен быть задан $2^n - 1$ членами в правой части. На форму волны, амплитуду или фазу циклов не накладывается никаких ограничений. Разумеется, в реальной задаче существует проблема шума в системе, когда наблюдение Y_t состоит из сигнала y_t и ошибки ϵ_t . Например, в уравнении (2) на сигналы y_{t-l_1}, y_{t-l_2} и $y_{t-l_1-l_2}$ могут накладываться ошибки ϵ_1, ϵ_2 и $\epsilon_{1,2}$ соответственно. Для контроля за этим шумом мы выполняем процедуру множественной оценки сигнала y_t следующим образом:

$$\hat{y}_t(n_1, n_2) = Y_{t-n_1p_1} + Y_{t-n_2p_2} - Y_{t-n_1p_1-n_2p_2}, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 составляют все возможные комбинации целых чисел, допустимых для исследуемого набора данных. Среднее значение этих оценок величины $\hat{y}_t(n_1, n_2)$ может быть использовано как прогноз.

Уравнения (2) и (3) верны только в том случае, когда сигналы от различных периодических составляющих аддитивны. Однако нет уверенности, что в сложной физической системе эта аддитивность выполняется; рассмотрим путь обхода этого затруднения. Например, пусть у нас есть несинусоидальные сигналы с характерными временами $p_1=8$ лет и $p_2=12$ лет. При анализе Фурье годовых значений потребуется по крайней мере 11 коэффициентов Фурье для описания этих сигналов и еще больше коэффициентов понадобилось бы для включения членов, связанных с взаимодействием. Период $p_{1,2}=24$ года является точным периодом повторения (ТПП), так что теперь мы можем использовать следующие прогностические уравнения:

$$\hat{y}_t(n) = Y_{t-n \cdot 24}, \quad (4)$$

независимо от того, аддитивны ли сигналы с периодами 8 и 12 лет.

Пусть теперь $p_1=8$, а $p_2=12,2$. Эти периоды уже несоизмеримы и 24 года более не представляют собой ТПП, а лишь при-

близительный период повторения (ППП). Если же взять 48 лет, то расхождение двух этих циклов по фазе удвоится по сравнению с предыдущим случаем; поэтому в следующем ниже рассмотрении и примере использования метода мы определяем ППП как интервал, на котором расхождение по фазе у процентов с периодами p_1 и p_2 не превышает 18° ($\cos 18^\circ = 0,95$). Таким образом, нам следовало бы при рассматриваемых значениях p_1 и p_2 считать уравнение (4) верным только для $n \leq 2$.

Из-за шумов в системе прогнозы по уравнениям (1)–(4) должны содержать ошибку, возникающую из двух источников. Можно попытаться как-то контролировать их уровень, но не уровень ошибок, относящихся к Y_t , предсказываемой величине в наблюдении. Мы можем записать прогноз в общем виде:

$$\hat{y}_t = \sum_{i=1}^m a_i Y_{t-l(i)}, \quad \sum a_i = 1, \quad (5)$$

где $Y_{t-l(i)}$ — это m предыдущих значений Y с запаздыванием $l(i)$, отобранных для использования в прогностическом уравнении. Если дисперсия сигнала s^2 , то дисперсия наблюдений $\sigma_Y^2 = s^2 + \sigma^2$, где σ^2 — дисперсия ошибки ε^2 . При $s^2 = 0$ ожидаемая среднеквадратичная ошибка (СКО) должна иметь вид

$$E(\text{СКО}) = \sigma_Y^2 (1 + K), \quad (6)$$

где

$$K = \sum_{i=1}^m a_i^2. \quad (7)$$

Мы не будем вводить здесь предположение, что $\varepsilon_i \varepsilon_j = 0$, поскольку в наших прогнозах используются большие временные задержки ($l = |i - j| \gg 50$), и поэтому сомнительно, что ε_i и ε_j коррелированы; в противном случае они содержат некоторый сигнал, который остался еще не выявленным.

Для достаточно длинных рядов Y_t с дисперсией σ_Y^2 можно определить и сравнить с ожидаемыми реальными значениями СКО и коэффициента корреляции между Y и y . Если отношение СКО к $E(\text{СКО})$ значительно меньше единицы, можно считать, что это свидетельствует о наличии сигнала s ; в этом случае нужно исследовать остаток $e_t = Y_t - \hat{y}_t$ для выявления еще одного прогнозируемого сигнала. Дополнительно можно включить в исследование периоды, полученные из спектрального анализа или автокорреляции, можно также привлечь для этого метод авторегрессии.

2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАЗНОСТНЫХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ И ФИЛЬТРАЦИИ (РПУФ)

В приводимом здесь примере исследуется предсказание месячных чисел солнечных пятен за период с января 1749 по декабрь 1977 г. В данном случае применение РПУФ базируется на рассмотрении 9 основных частот, относящихся к периодам обращения планет Солнечной системы. Выбор частот никак не зависит от эмпирического анализа ряда данных о числе солнечных пятен (СП). Поэтому, если частоты не имеют отношения к солнечным пятнам, применение РПУФ к выбранному ряду не может дать полезных и правильных прогностических уравнений. Подчеркнем, что в анализе присутствуют не только периоды p_1, p_2, \dots, p_9 , но еще и некоторые периоды повторения, соответствующие комбинациям рассматриваемых частот. Поскольку основные периоды несоизмеримы, то дополнительно выбранные нами периоды повторения представляют собой ППП, определенные в предыдущем разделе. Используемые здесь в анализе ППП были отобраны исходя из априорных соображений безотносительно к наблюдательным данным о солнечной активности. В дальнейшем они будут обозначены как p_1', p_2', p_3' и т. д. Удобным способом выбора ППП для исследуемых 9 периодов обращения планет является исследование функции

$$\bar{C}_t = \frac{1}{\sum w_i^2} \sum_{i=1}^9 w_i \cos 2\pi f_i t \quad (8)$$

при малых приращениях t начиная с $t=0$ и заканчивая, например, $t=300$ лет. Можно рассматривать по крайней мере три набора статистических весов: $w_i(1) = 1/9$, $w_i(2) = M_i R_i^{-2}$ и $w_i(3) = M_i R_i^{-3}$, где M_i — масса i -й планеты, а R_i — ее среднее расстояние от Солнца. Поскольку $\bar{C}_t = 1$ при $t=0$, изучение графика \bar{C}_t при больших значениях t должно указать момент, когда элементарные циклы опять находятся в фазе. На рис. 1 показан график \bar{C}_t для первых 14 лет, веса здесь пропорциональны $M R^{-3}$ (приливная сила). Обращает на себя внимание наибольший пик при $t=11,08$ года. Кривые, построенные для весов $w_i(1)$ и $w_i(2)$, имеют приблизительно ту же форму — наиболее высокий пик всегда соответствует 11,08 года. Кривая на рис. 1 в сущности представляет собой автокорреляционную функцию.

При продолжении кривых, аналогичных кривой на рис. 1, вплоть до 200 лет, появляются только три дополнительных больших пика, превосходящих пик при 11,08 года в случае использования весовых функций $w_i(2)$ и $w_i(3)$. Эти пики расположены при 24,07, 59,03 и 83,1 года. В случае равных весов ($w_i = 1/9$)

существует пик при 179,0 года, наибольший по величине в интервале 11,08 и 179,0 лет. Было найдено, что ППП, которые должны были использоваться в прогнозе по разностным уравнениям, составляют $p'_1 = 133$ мес, $p'_2 = 96$ мес, $p'_3 = 289$ мес, $p'_4 = 708$ мес, $p'_5 = 997$ мес и $p'_6 = 2148$ мес. Не оказалось ППП короче 8 лет. Все прогностические уравнения, использующие ком-

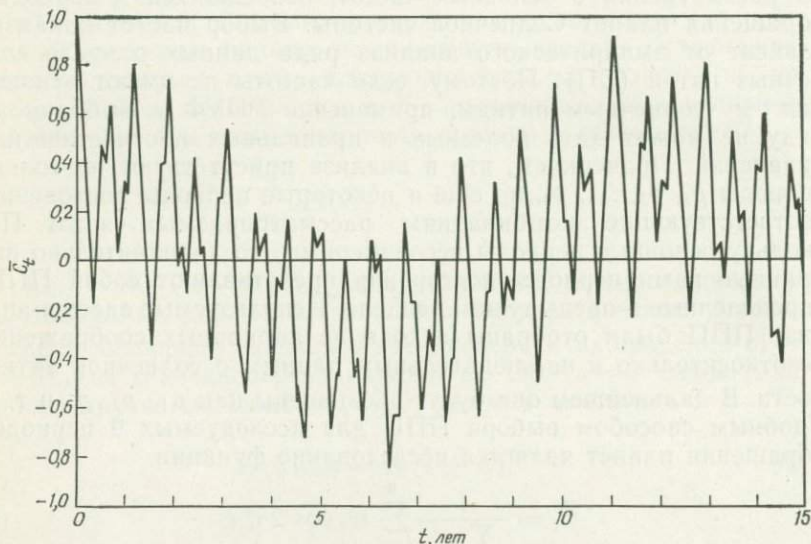


Рис. 1. Взвешенное среднее от девяти функций $\cos 2\pi f_j t$, где f_j — период обращения планеты. Веса пропорциональны MR^{-3} , где M — масса планеты и R — ее среднее расстояние от Солнца.

бинации p' , оказались пригодными для целей прогноза. Типичный пример такого уравнения:

$$\hat{y}_t = Y_{t-133} + Y_{t-96}/2 + Y_{t-192}/2 - Y_{t-229}/2 - Y_{t-325}/2, \quad (9)$$

оно дает коэффициент корреляции $r=0,56$ между Y и \hat{y} . Дальнейшее улучшение ($r=0,63$) было получено при использовании уравнения (10), не приведенного здесь. Оно содержало 27 членов ($\sum a_i^2 = 2,854$), и в нем использовались ППП от p'_1 до p'_5 . Спектральный анализ остаточных ошибок показал, что около 50 % вариации происходит в узком диапазоне вблизи периода 10 лет. Поскольку из рис. 1 следует возможность существования ППП вблизи этого периода, было проведено дополнительное исследование, которое выявило ППП в 119 месяцев, пропущенное ранее. Предварительный корреляционный и спектральный анализ дает основания предполагать, что авторегрессионные мо-

дели позволят улучшить прогнозы с заблаговременностью от нескольких месяцев до года или двух.

В дополнение отметим, что спектральный анализ числа пятен по данным 2628 месяцев за период с 1749 по 1967 г. включительно выявил пики, соответствующие ППП вблизи 10, 11, 59 и 83 года (рис. 2). Это интересное совпадение наводит на мысль

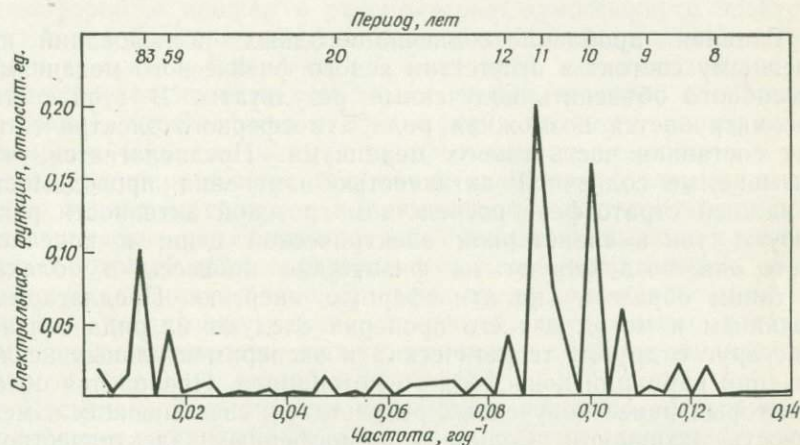


Рис. 2. Косинус-преобразование (несглаженное) от 2148 автокорреляций для 2628 среднемесячных чисел солнечных пятен.

о необходимости дальнейших исследований противоречивого вопроса о связи планет с солнечными пятнами.

Это исследование выполнено частично при поддержке Национального управления по исследованию атмосферы и океана в рамках субсидии № 04-7-022-4407 и частично Национального научного фонда в рамках субсидии АТМ 76-18860.

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ПРОБЛЕМА СВЯЗИ МЕЖДУ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ПОГОДОЙ

Р. Марксон

Главная проблема солнечно-погодных исследований по-прежнему состоит в отсутствии ясного физического механизма, способного объяснить полученные результаты. В этой статье рассматривается возможная роль атмосферного электричества как составная часть такого механизма. Предполагается, что вызываемые солнечной активностью изменения проводимости в нижней стратосфере посредством грозовой активности регулируют ток в планетарной электрической цепи; в конечном счете они воздействуют на физические процессы в облаках и, таким образом, на атмосферную энергию. Предлагаемые механизм и метод для его проверки следуют из ряда связанных друг с другом теоретических и экспериментальных исследований вариаций ионосферного потенциала. Приводится обзор некоторых ранее полученных результатов, связывающих изменчивость активности Солнца с атмосферным электричеством. Рассмотрены проверка концепции планетарного электрического контура и введение параметра солнечного сектора в солнечно-погодные исследования. В общих чертах намечается эксперимент для решающей проверки роли электричества в предлагаемом механизме; в нем планируется шаропилотное зондирование электрической проводимости атмосферы по крайней мере один раз в сутки в течение года или более. Такие наблюдения позволили бы связать пространственные и временные вариации ионосферного потенциала и стратосферной проводимости с управляющими ими факторами солнечной активности. Таким образом, можно установить «геоэлектрический индекс», отражающий представление о планетарных грозových токах и дополняющий «геомагнитный индекс», который оказался бесценным в солнечно-земных исследованиях.

1. ВВЕДЕНИЕ

В этой статье рассматривается возможная роль атмосферного электричества в солнечно-погодных связях и планетарный электрический контур в качестве связующего звена между

изменениями солнечной активности и параметрами погоды. Поскольку поступление энергии в атмосферу по существу неизменно (солнечная постоянная изменяется менее чем на 1% во временном масштабе по крайней мере до десятилетий), а метеорологические параметры, которые действительно меняются при изменении солнечной активности, ограничены верхней атмосферой, очень слабо взаимодействующей с нижней атмосферой, я пришел к рассмотрению атмосферного электричества как фактора, связывающего изменения солнечной активности и погоду. Единственной величиной, которая зависит от солнечной активности и в то же время заметно изменяется в нижней стратосфере и тропосфере, является ионизирующая радиация. Она воздействует на проводимость атмосферы и тем самым регулирует токи, текущие в планетарной электрической цепи, а следовательно, и напряженность электрического поля. Электрические поля окружающей среды и ионизирующая радиация в большой мере определяют процессы электризации облаков и выпадения осадков. Поэтому представляется возможным оценить последовательность процессов, посредством которых солнечная активность может управлять перераспределением энергии, уже накопленной в атмосфере.

Поскольку большинство параметров солнечно-земного взаимодействия, по-видимому, в какой-то степени зависит от положения Земли в солнечном магнитном поле [1] и поскольку мы не знали, какие физические механизмы принимают в этом участие, я решил использовать пересечения секторных границ солнечного магнитного поля в качестве временных меток при анализе изменений частоты гроз методом наложенных эпох. Первый результат такого рода показан на рис. 1.

К тому времени (1969 г.) в наличии имелся лишь интервал в 14 месяцев, содержащий данные как о грозовой активности, так и о пересечениях солнечного сектора. В этом исследовании [2] выявилось соотношение между изменениями грозовой активности и положением Земли в солнечных магнитных секторах: оказалось, что грозовая активность возрастает до максимума в первые сутки прохождения отрицательных секторов (данные только по грозам в США; подробнее см. работу [3]). Необходимо понимать важность нормирования секторов к единичной длине (путем их «растягивания» или «сжатия», так как длина секторов меняется от 4 до более 20 сут); тем самым рассчитывается индекс частоты гроз как функция *положения в секторе*. Если эта процедура не применяется, т. е. если используется индекс частоты гроз приращениями в одни сутки, то эффект не проявляется. Это означает, что разности фаз между секторами различной длины вызывают сигналы на некотором расстоянии от ключевого дня (пересечения границы), которые

гасят друг друга. А раз так, значит, этот «солнечный» сигнал меняется как функция геометрического положения Земли внутри

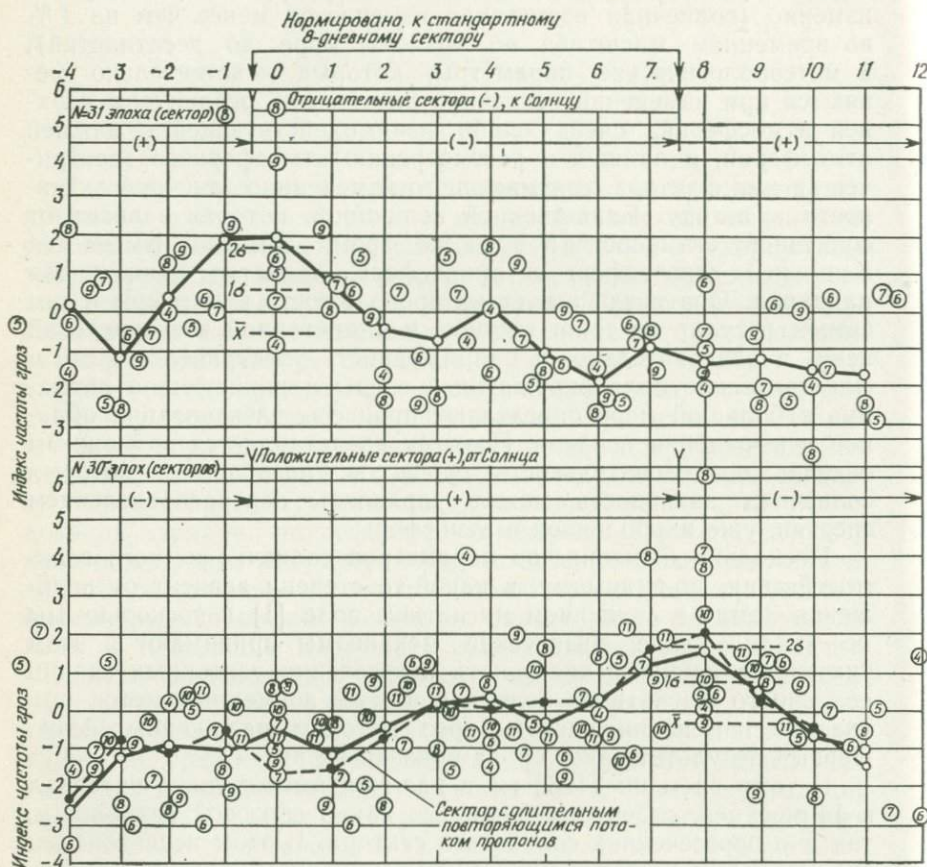


Рис. 1. Индекс частоты гроз как функция положения Земли относительно солнечного сектора магнитного поля. Переход в соседний сектор противоположной полярности происходит в 0-й и 8-й дни. Кривые проведены через геометрическое место точек, ближайших к каждому суточному приращению времени. Цифры в кружках — число дней в секторе, нормированном к единичной длине, т. е. каждая точка представляет собой среднее значение индекса для всех секторов данной длины при данном приращении длины сектора [2].

солнечного сектора, а не как сигнал с фиксированным интервалом времени от пересечения границы сектора. Например, высокоскоростные потоки солнечного ветра проявляются вблизи середины солнечных секторов [4].

Впоследствии такой подход, включающий рассмотрение солнечного сектора, был использован Уилкоксом и др. [5] для

поиска связи между пересечениями сектора и индексом завихренности (VAI), предложенным Робертсом и Олсоном [6]. Эффект VAI был обнаружен в пределах около 1 сут от пересечения сектора, но это могло быть результатом использования ненормированных длин сектора, как отмечалось выше. Мы предполагаем повторить анализ VAI, используя нормированные длины секторов.

2. КЛАССИЧЕСКАЯ СХЕМА АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Теперь необходимо в общих чертах обрисовать классическую схему атмосферного электричества и кратко рассмотреть неко-

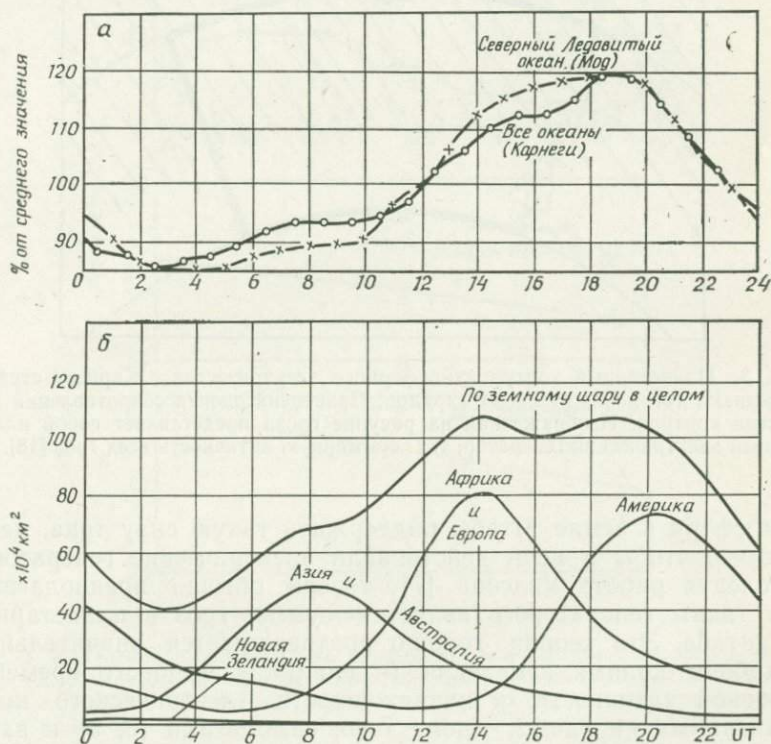


Рис. 2. Суточные изменения: а — градиента потенциала над океанами (наблюдения на станции Мод относятся только к зимнему периоду в северном полушарии) и б — площади, охваченной грозами (местность относят к площади, охваченной грозой в данное время, если гроза происходила в интервале 60 мин до или после этого времени) [3].

торые ранее полученные результаты, относящиеся к влиянию солнечной активности на параметры атмосферного электрического поля. На рис. 2 показана хорошо известная вариация

электрического поля по поясам мирового времени (унитарная вариация), измеренная над океанами, на которой базируется классическая схема атмосферного электричества. Экспериментально было установлено, что это электрическое поле поддерживается током проводимости из ионосферы (где проводимость достаточно высока, так что ее можно рассматривать как эквипотенциальную поверхность) через слабо проводящую нижнюю

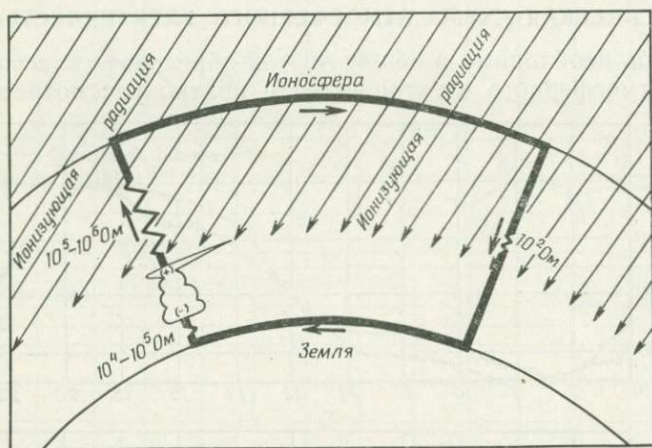


Рис. 3. Планетарный контур атмосферного электричества. Жирные стрелки указывают ток положительных зарядов. Приведена оценка сопротивлений элементов контура. Изображенная на рисунке гроза представляет собой планетарный электрический генератор, т. е. суммарную активность всех гроз [18].

атмосферу к земле. Чтобы поддержать такую силу тока, необходимо, чтобы в цепи действовали электрические генераторы, и, следуя работе Уилсона [7], теперь обычно предполагают, что таким генератором является сумма гроз в планетарном масштабе. Эта теория хорошо подтверждается значительным подобием кривых изменения (в единицах мирового времени) грозовой активности и напряженности электрического поля, показанных на рис. 2. Кроме того, самолетные [8, 9] и аэростатные [10] измерения над грозами подтвердили, что положительный ток достаточной величины течет вверх от вершин грозных облаков в соответствии с моделью планетарного электрического контура.

Планетарный контур атмосферного электричества представлен в обобщенном виде на рис. 3, из которого видно, что токи над грозами направлены вверх к проводящей ионосфере. Ток между проводящей землей и грозным облаком возникает за

счет ионной проводимости, одиночных разрядов и зарядов, переносимых осадками и молниями. Возвратная ветвь контура

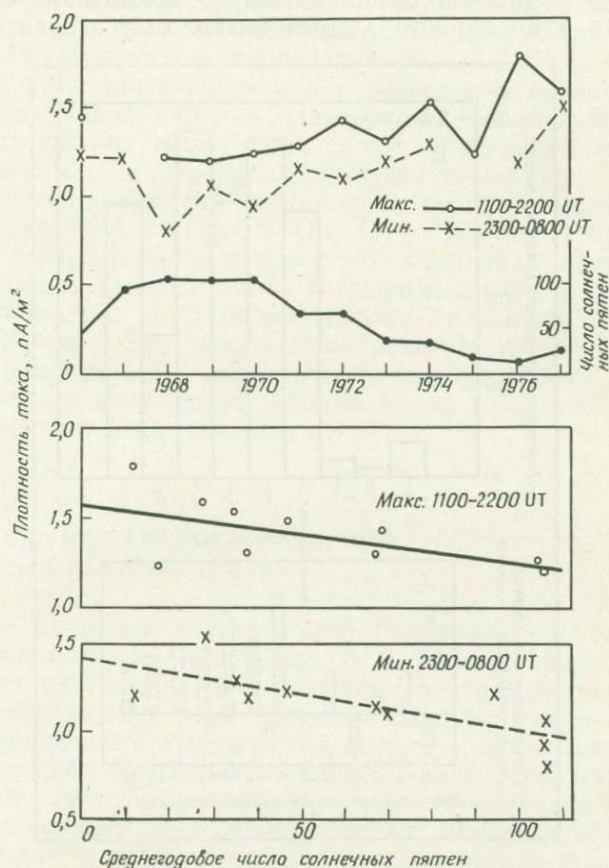


Рис. 4. Изменения плотности тока проводимости в системе атмосфера—земля за время солнечного цикла. Шаропилотные измерения выполнены Олсоном [13]. Данные разделены на два набора, один из которых относится ко времени в области максимума электрического поля, а другой — минимума электрического поля унитарной суточной вариации. На двух нижних диаграммах показана обратная корреляция между плотностью тока и числом солнечных пятен для каждого набора данных.

представляет собой ток, направленный от ионосферы к земле, в областях с хорошей погодой, удаленных от областей с грозовой активностью. Из рис. 3 можно видеть, что верхние части как генератора, так и возвратной ветви («нагрузки») контура легко доступны для приходящей ионизирующей радиации. Отно-

сительное значение каждого участка токовой цепи в планетарном контуре будет кратко рассмотрено.

Первый обширный обзор данных о возможной солнечной модуляции атмосферного электричества был сделан Бауэром

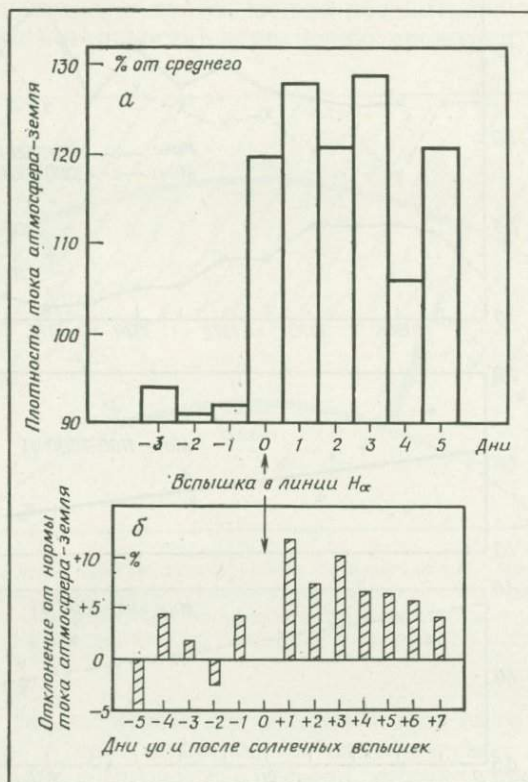


Рис. 5. Вариации плотности тока атмосфера—земля от ее среднего значения до и после солнечных вспышек: а — по Рейтеру [14, 15] и б — по Коббу [16].

[11], который обнаружил положительную и отрицательную корреляции между напряженностью электрического поля и 11-летним циклом солнечных пятен. Купер [12], по-видимому, первый сообщил об изменениях в атмосферном электричестве, связанных со вспышками на Солнце. Более поздние и убедительные работы в этих направлениях обобщены на рис. 4 и 5. На рис. 4 Олсон [13] показал изменение плотности тока проводимости (измеренной с помощью шаров-пилотов) в системе атмосфера—земля в сопоставлении с солнечным циклом. Он разделил свои данные на две части, одна из которых представляет собой

часовые значения вблизи максимума унитарной вариации напряженности поля, а другая — вблизи минимума этой вариации. Мы привели внизу раздельные графики, чтобы показать наличие отрицательной корреляции между током в цепи атмосфера—земля и числом солнечных пятен для обоих наборов данных. (Коэффициенты корреляции равны 0,67 ($p < 0,05$) и 0,74 ($p < 0,01$) для максимумов и минимумов вариаций соответственно.) Такая картина предполагает солнечную модуляцию галактических космических лучей, обусловившую изменение плотности тока. На рис. 5 показано увеличение плотности тока в системе атмосфера—земля сразу после вспышек в линии $H\alpha$, обнаруженное Рейтером [14, 15] и Коббом [16]. Чтобы получить больший набор данных, мы объединили здесь данные Рейтера за два периода в одну гистограмму (рис. 5, а). Результаты Кобба (рис. 5, б) обнаруживают тенденцию, подобную данным Рейтера. Эти результаты свидетельствуют о быстром отклике атмосферного электричества на солнечные вспышки и о солнечной ионизирующей радиации как возможной побудительной причине этого отклика.

3. ПРОДОЛЖЕНИЕ АНАЛИЗА СВЯЗИ «СОЛНЕЧНЫЙ СЕКТОР — ГРОЗА»

В 1973 г., когда планировался Годдардовский симпозиум по солнечно-погодным проблемам, В. О. Робертс предложил мне сделать на нем доклад, при условии что я рассмотрю физические механизмы; при этом предполагалось, что имеется достаточное количество статистических данных о связи между Солнцем и погодой. Это привело меня к рассмотрению вопроса о том, как изменение солнечной активности могло бы воздействовать на атмосферный электрический планетарный контур. Специалистам в области атмосферного электричества хорошо известно, что изменения проводимости, вызываемые вариациями ионизирующей радиации, происходят в атмосфере на достаточно больших высотах и поэтому не могут существенно влиять на электрические поля в областях земного шара с хорошей погодой. Однако, несмотря на это, в планетарном контуре имеется один элемент, который включает существенную долю его общего сопротивления и находится достаточно высоко, чтобы подвергаться солнечной модуляции ионизирующей радиации; таким участком контура является сопротивление атмосферного столба над планетарным генератором гроз. Эта идея лежит в основе упомянутой выше статьи [17]. Недавно данная концепция была расширена и описана более детально [18].

Благодаря независимо полученным Свалгаардом [19] и Мансуровым [20] данным о том, что пересечения солнечного сектора магнитного поля можно определять из регистраций геомагнитного поля, стало возможным расширить базу данных моего первоначального анализа связи грозовой активности с пересечениями секторных границ. Первоначальное исследование включало 61 эпоху от конца 1964 г. по 1965 г. включительно, тогда как новые данные включали 179 эпох и охватили большую часть солнечного цикла за период с 1957 по 1965 г. Теперь оказалось возможным разделить все данные на два независимых набора, один из которых включает период минимума солнечных пятен (1962—1965 гг.), а другой — максимума (1957—1961 гг.). Результаты представлены на рис. 6, из которого легко видеть, что в обоих наборах данных проявляется та же тенденция, что и в более раннем, менее представительном анализе. Важность нормировки секторов к единичной длине показана на рис. 6, в, где сигнал осредненного индекса частоты гроз нивелируется, если длины секторов не нормированы. Эти результаты были доложены на конференции МГСС в Гренобле (Франция) в 1974 г. [21].

Недавно Лесбридж, который предложил первоначальный индекс частоты гроз, представил данные за период с 1966 по 1976 г. В дополнение к ним я использовал еще более ранние данные, от начала непрерывной регистрации гроз в 1947 г. Таким образом, были объединены три независимых набора данных ($n = 754$), включая информацию о грозах в США за десятилетия; 1947—1956, 1957—1966, 1967—1976 гг. Эти данные были обработаны, как и раньше, но с введением единичной длины сектора, разбитой на сорок поддиапазонов равной длины, а индекс частоты гроз был построен для каждой такой части сектора. Такой индекс представляет собой сумму всех дней с грозами (Бюро погоды США регистрирует их на восточных $\frac{2}{3}$ территории США) минус 21-дневное скользящее среднее, центрированное на этот день. В этом индексе нет фильтрации суточных сумм гроз, хотя корни кубические из этого количества взяты в соответствии с первоначальным индексом Лесбриджа [3]. Таким образом, индекс частоты гроз представляет собой остаточную величину после удаления сезонных и межгодовых вариаций.

На рис. 7 представлены результаты этого самого последнего исследования, и снова мы видим тот же самый тренд, что и в более ранних работах. Значимость данных в проведенных исследованиях трудно оценить, поскольку неизвестно число степеней свободы, так как данные в процессе обработки используются несколько раз. Это число не выше 40 (число наборов, соответствующих поддиапазнам в секторе) минус 2

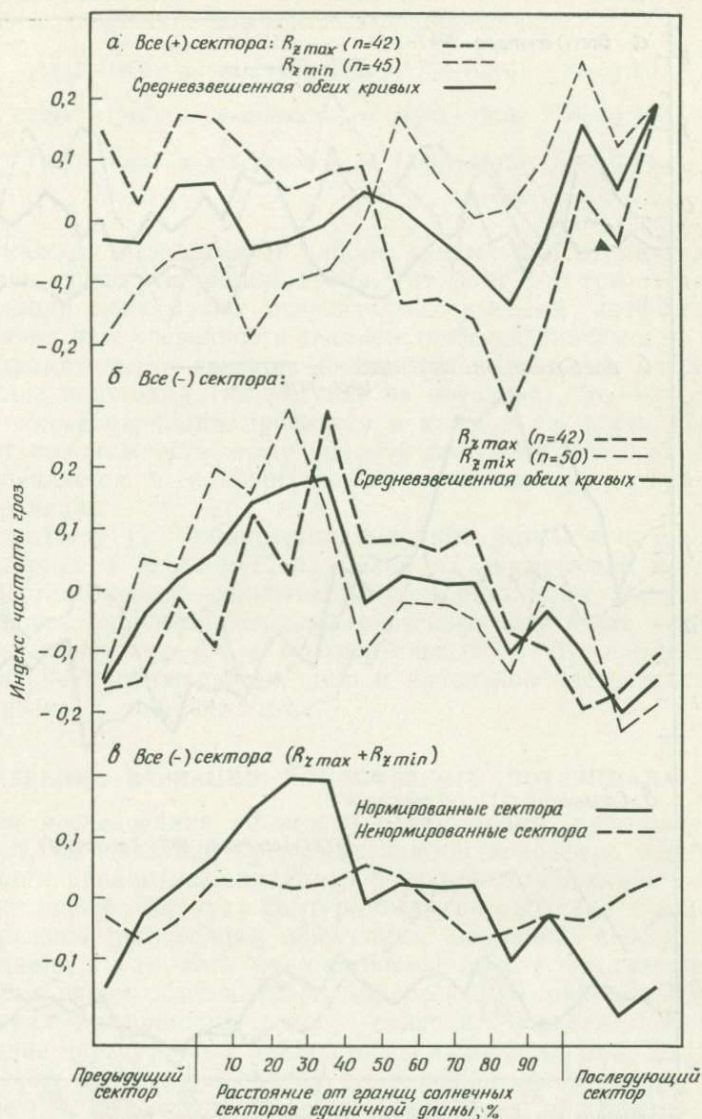


Рис. 6. Изменение грозовой активности в США в сопоставлении с положением Земли внутри солнечного сектора. Видно характерное уменьшение числа гроз по длине всего сектора для случая отрицательных секторов (б). На в показано, что при отсутствии нормировки секторов к единичной длине эффект не проявляется [21].

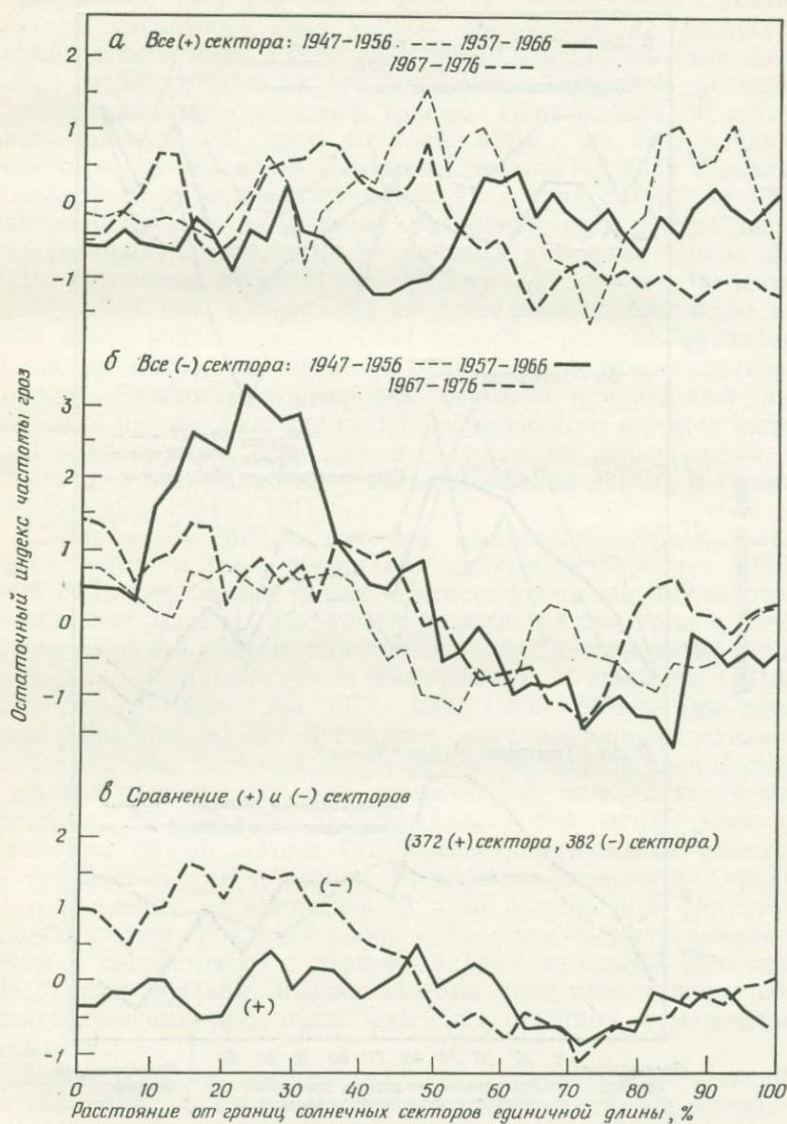


Рис. 7. Новые результаты, полученные с использованием большого количества данных в анализе «частота гроз—пересечение границ солнечного сектора». Вновь отмечается характерное изменение грозовой активности за время прохождения сектора для отрицательных секторов. На нижнем рисунке сравниваются сектора единичной длины для всего периода наблюдений 1947—1976 гг.

(число переменных), т. е. 38. Однако в процессе анализа были получены следующие коэффициенты корреляции:

(1947—1956) в зависимости от (1957—1966) $r=0,66$,

(1947—1956) в зависимости от (1967—1976) $r=0,48$,

(1957—1966) в зависимости от (1967—1976) $r=0,54$.

В каждом независимом наборе данных для отрицательных секторов существует общий тренд. Тот факт, что три отдельные корреляции показывают относительно высокий коэффициент, добавляет нам уверенности в статистической значимости. Если эти отрицательные сектора дополнительно разбить на летние и зимние полугодия (на рисунке не показано), те же самые характерные вариации проявятся в каждой из шести кривых. В противоположность этому никакой систематической вариации не проявляется в положительных секторах, где отсутствует и корреляция.

Силвермен [22] обнаружил подобные результаты при анализе вариаций электрических полей на арктических станциях в сопоставлении с солнечными секторами. Он нашел, что а) средняя напряженность электрического поля выше в отрицательных секторах, чем в положительных, и б) наблюдается увеличение напряженности поля в начальной части сектора и уменьшение в конце сектора.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ВАРИАЦИЙ ИОНОСФЕРНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Для исследования гипотезы планетарного электрического контура, включающей представления об ионосфере как о поверхности равного потенциала и о возможном влиянии солнечной активности на этот контур, была разработана программа непрерывной регистрации временных вариаций ионосферного потенциала с самолета на постоянной высоте, достаточно высоко над слоем обмена [23]. Андерсон [24] ранее продемонстрировал пригодность такого подхода, проведя измерения в течение двухсуточных циклов через каждые 15 мин. На рис. 8 приведены результаты оценок ионосферного потенциала, полученные при выполнении разработанной мною программы. Если полученные из этих данных значения, осредненные двухчасовым скользящим средним, нанести на график (рис. 9), то ясно вырисовывается унитарная вариация, определенная кривой Карнеги (см. рис. 2). В процессе исследования было обнаружено, что самолетные измерения в районах с низким фоном шумов позволяют проследить временную вариацию потенциала

ионосферы. В общем случае ее нельзя получить из наземных измерений ввиду локальных воздействий внутри слоя обмена. Даже в подходящих для исследования областях, таких как Арктика или Антарктика, обычно необходимо статистическое осреднение данных за 7—10 сут, прежде чем унитарная вариация становится ясной [25].

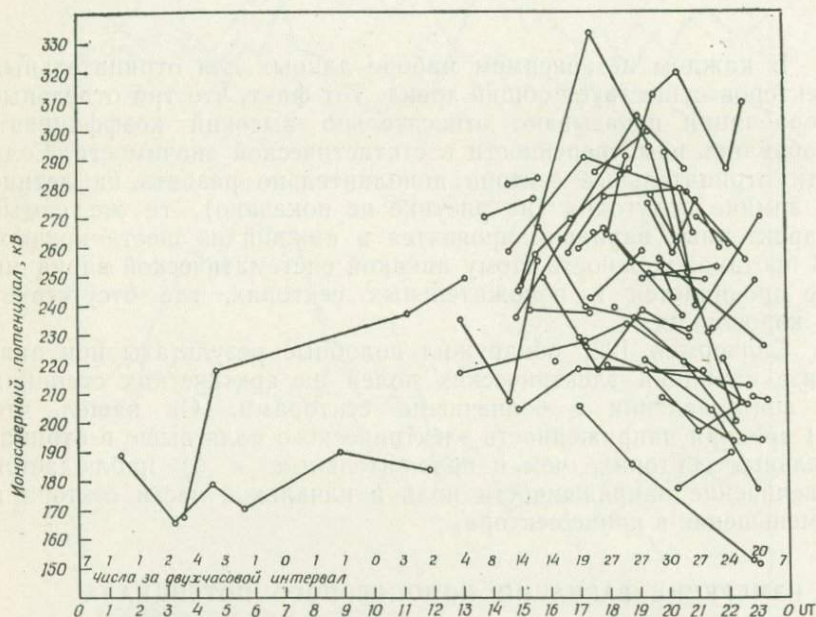


Рис. 8. Сводка оценок потенциала ионосферы, полученных при самолетных исследованиях (1971—1972 гг.). Линиями соединены данные, полученные в один и тот же день. Унитарная вариация видна каждый день, когда проводилось несколько измерений [2].

Изменение потенциала ионосферы можно зарегистрировать в реальном времени. Это продемонстрировано на рис. 10, где показано согласие между одновременными самолетными измерениями, которые выполнены в пунктах, разнесенных на 7000 км [23].

Результаты, представленные на рис. 8—10, не только обеспечивают важные доводы в пользу классической схемы атмосферного электричества, но и одновременно указывают путь экспериментального изучения предлагаемого механизма (см. разд. 6).

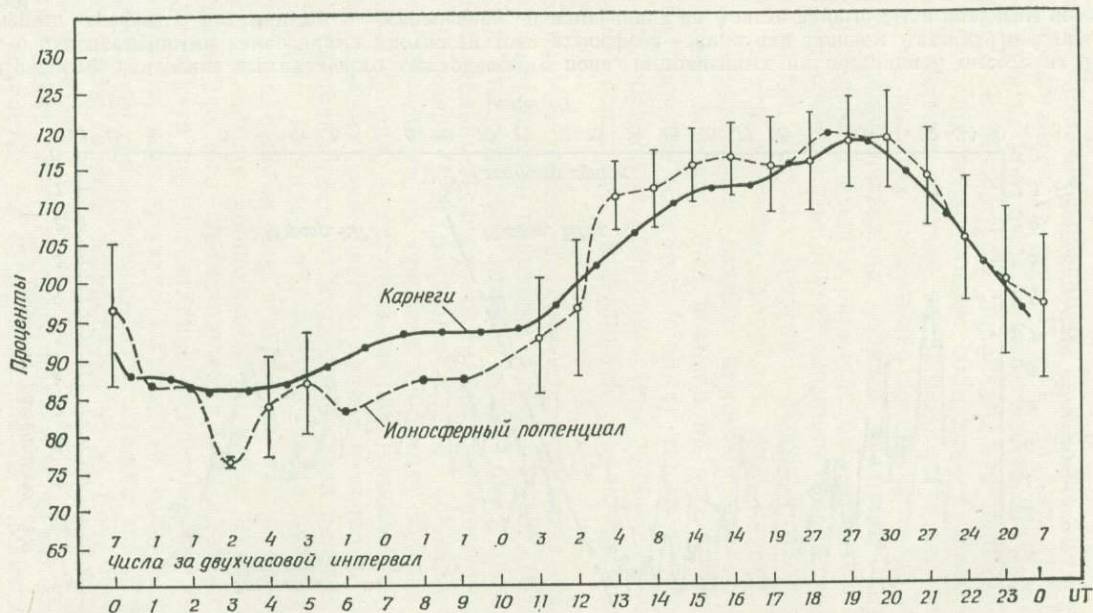


Рис. 9. Кривая, нормированная двухчасовым скользящим средним (получена по данным рис. 8). Число зондирований за двухчасовой интервал приведено над осью абсцис. Для сравнения воспроизведена нормированная унитарная вариация электрического поля Карнеги, приведенная на рис. 2. Коэффициент корреляции между двумя кривыми равен 0,96 [23]. Вертикальные отрезки соответствуют одному среднему квадратичному отклонению.

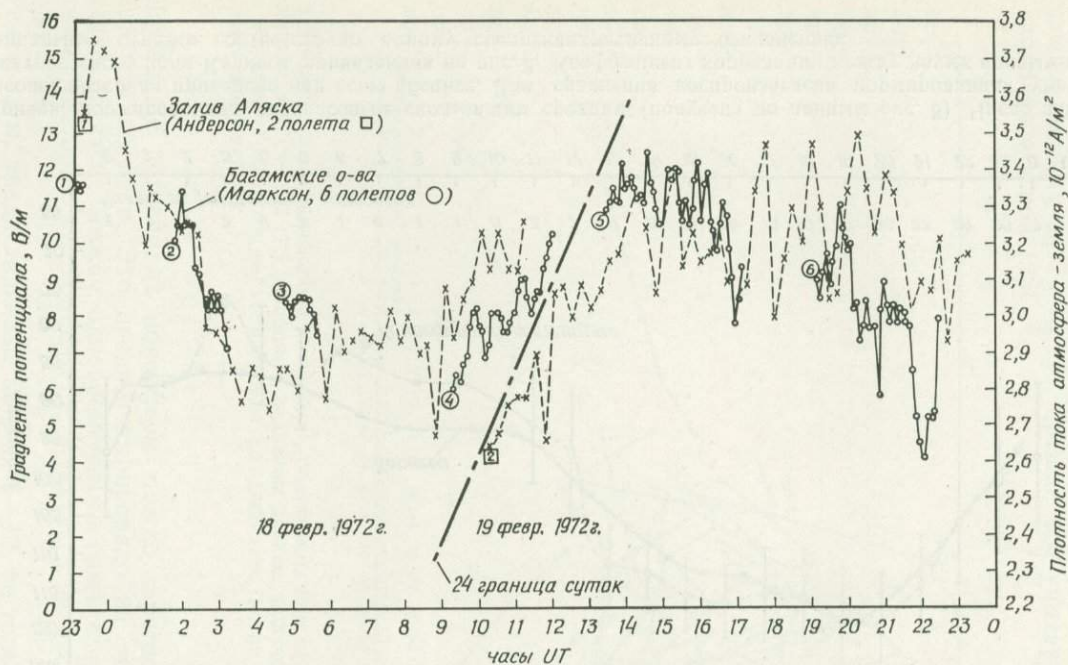


Рис. 10. Сравнение измерений вертикального электрического поля, выполненных на постоянной высоте на Багамских островах, с одновременными измерениями плотности тока атмосфера—земля над заливом Аляска. По багамским данным вычерчен график с пятиминутным осреднением, в измерениях на Аляске данные были получены через каждые 15 мин [23].

5. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕХАНИЗМ СВЯЗИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА С АКТИВНОСТЬЮ СОЛНЦА

Этот механизм, описанный в работе [18], в обобщенном виде представлен на рис. 11—13. На рис. 11 мы видим некоторые прямые кратковременные отклики на солнечную вспышку. Холцворт и Мозер [26] показали, что вариации ионизирующей радиации под воздействием солнечной активности могут оказывать сильное влияние на проводимость верхней части атмосферы на высотах по крайней мере вплоть до 15 км, где она может увеличиваться на порядок величины. Хотя упомянутая в [26] вспышка была в определенных отношениях очень большой, многочисленные другие вспышки сопровождались испусканием частиц высоких энергий с большей плотностью потоков [27], и эти частицы проникали еще глубже в атмосферу. (Короткопериодный отклик атмосферного электричества на солнечные вспышки был показан на рис. 5.) В большем масштабе времени (солнечный цикл) также наблюдаются значительные изменения проводимости в нижней стратосфере, вызываемые солнечной модуляцией галактических космических лучей.

Типичные изменения скорости ионизации на высоте 20 км в функции широты показаны на рис. 12 [28]. (Соответствующий отклик атмосферного электричества был показан на рис. 4.) Дополнительные свидетельства из шаропилотных экспериментов Винклера [29] показывают, что ионизация в диапазоне высот 20—30 км в средних широтах обычно *увеличивается* в 10—100 раз в периоды *форбуш-понижений* интенсивности галактических космических лучей, измеренных на земле. Эти аспекты предлагаемого механизма были развиты недавно [30].

Из рис. 13 видно, что верхние части планетарного контура, включающие ветви как генератора, так и нагрузки, доступны для воздействия ионизирующей радиации (как солнечного, так и галактического происхождения). Изменения проводимости будут влиять на эффективное сопротивление этих двух ветвей контура, и, как показано на рис. 13, если сопротивление над генератором грозы уменьшается, скажем, на 50 %, сила тока от генератора должна возрасти на 45 %. Если сопротивление нагрузки останется постоянным, то потенциал ионосферы (и напряженность электрического поля в условиях хорошей погоды) тоже возрастет на 45 %; фактически увеличение произойдет лишь на 40 % ввиду небольшого (5 %) уменьшения сопротивления в возвратной ветви. Если электрическое поле в областях земного шара с хорошей погодой усилится, это может увеличить электризацию развивающихся кучевых облаков, если спра-

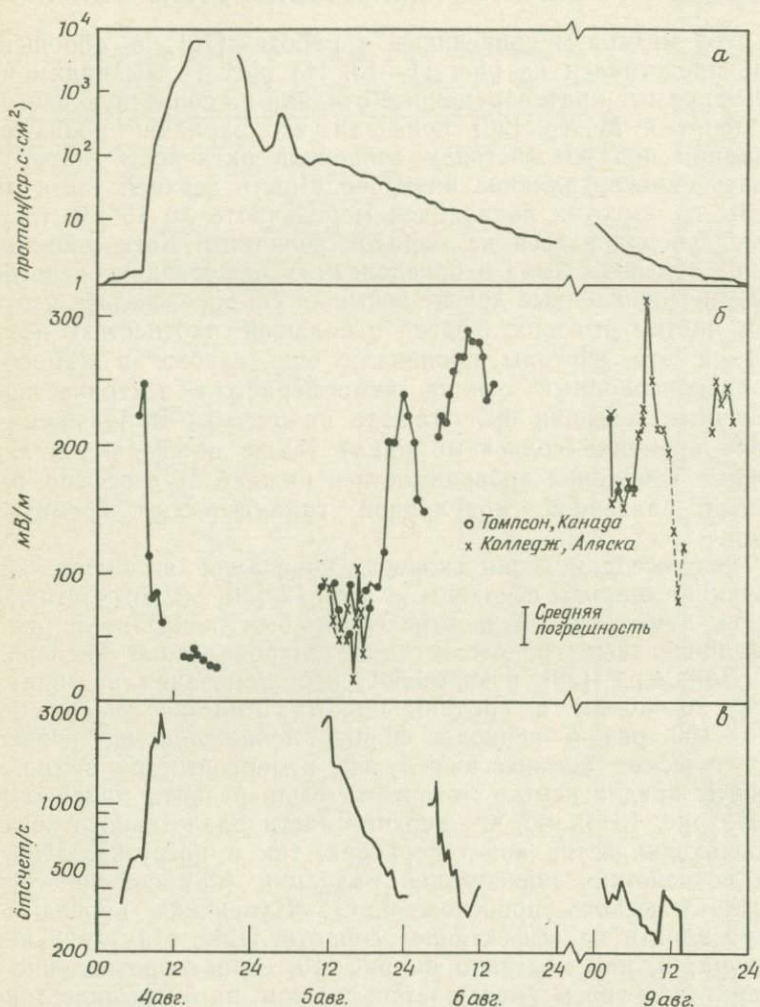


Рис. 11. Сопоставление одновременных измерений потоков солнечных протонов ($E_p > 60$ МэВ) на спутнике (а) с вертикальным электрическим полем на высоте 30 км (б) и интенсивностью ионизирующего излучения (в), полученных при шаропилотном зондировании на высоте 30 км. Солнечная вспышка произошла в 06 17 UT 4 августа 1972 г. [26].

ведливы одна или несколько из многочисленных теорий индукции при электризации облака [31]. Кроме того, увеличение

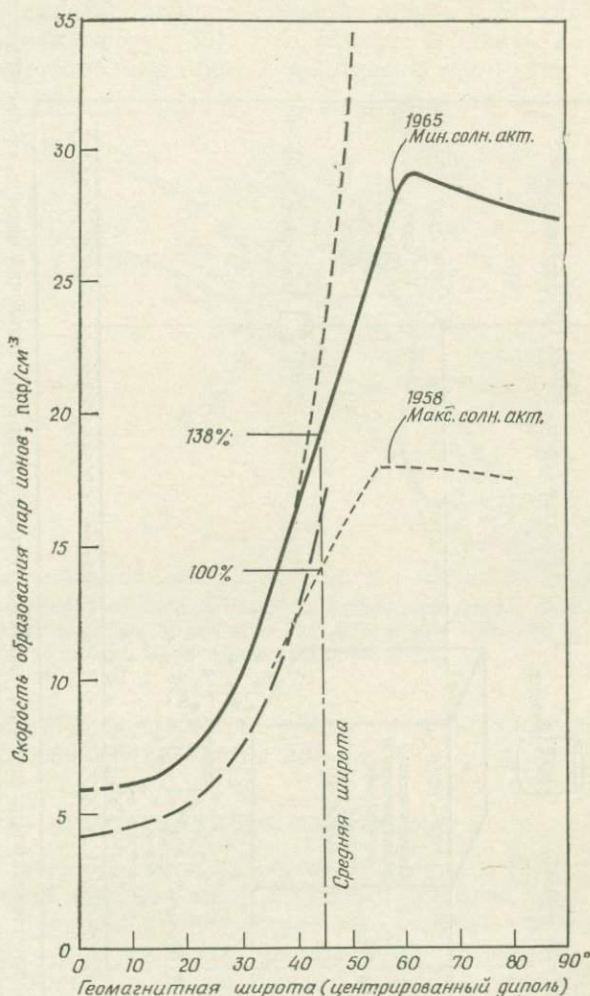


Рис. 12. Изменение скорости образования ионов на высоте 20 км как функция геомагнитной широты и солнечной активности. Отметим вариацию на средней широте, упомянутую в тексте [28].

проводимости в окрестности вершин кучево-дождевых облаков будет усиливать электризацию согласно механизму обмена зарядами в конвективных потоках по Грене [32] и Воннегату [33]. Эффекты физики облаков могут проявляться в таких

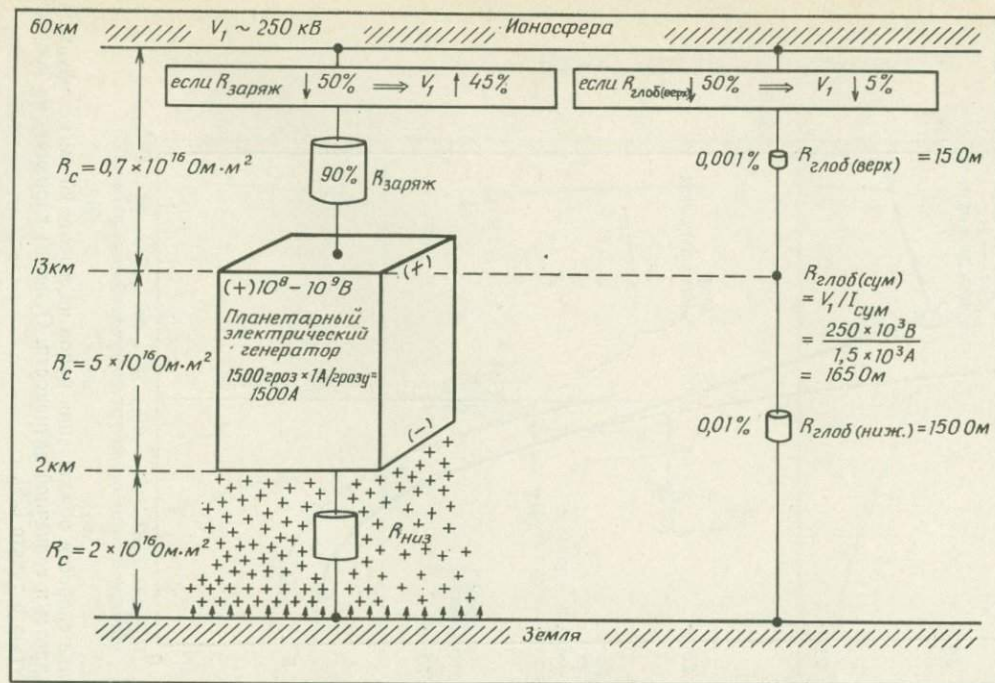


Рис. 13. Детальная схема планетарного контура, иллюстрирующая выбор сопротивлений цепи и их распределение по контуру [18]. (Сопротивления R_c не являются сопротивлениями как таковыми; для определения полного сопротивления столба воздуха их надо разделить на соответствующие горизонтальные площади поперечного сечения.)
 $R_{\text{заряж}} = V/I$, т. е. при $V=10^9$ оно равно $10^9/10^3=10^6 \text{ Ом}$, а при $V=10^8$ оно равно $10^8/10^3=10^5 \text{ Ом}$.
 $R_{\text{низ}}$ (до участия разрядных ионов) $= 2R_{\text{заряж}} = 2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6 \text{ Ом}$;
 $R_{\text{низ}}$ (после участия разрядных ионов) $= 10^4 \div 10^5 \text{ Ом}$.

условиях. Сильные электрические поля в облаках во время гроз могут приводить к изменениям фазового состояния воды и коалесценции капель, вызывая сильные ливни и отдавая скрытую теплоту в атмосферу [34]. Это может повлиять на мезомасштабные метеорологические процессы и процессы синоптиче-

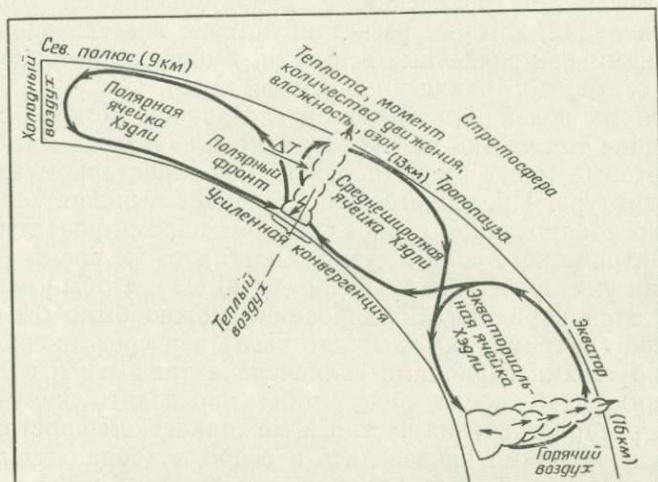


Рис. 14. Поперечное сечение атмосферы вдоль меридиана, иллюстрирующее, каким образом солнечное воздействие на физические процессы в облаках может повлиять на общую циркуляцию атмосферы [18].

ского масштаба, а также на общую циркуляцию атмосферы, как схематически показано на рис. 14.

6. ПРОВЕРКА ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕХАНИЗМА

Уникальные особенности планетарного контура атмосферного электричества создают благоприятные условия для проверки той части предложенного механизма, которая относится к атмосферному электричеству. Достаточно измерить потенциал ионосферы только в одном месте с помощью одного прибора, чтобы охарактеризовать электризацию атмосферы Земли над всей ее поверхностью (исключая области полярных шапок, где ионосферно-магнитосферные генераторы могут внести существенное местное искажение). Такое единичное измерение отличается от процедуры, которая требуется для определения среднепланетарных полей давления или завихренности; определение этих величин требует сотен одновременных запусков шаров-зондов, которые в соответствии с установленным порядком выполняются каждые 12 ч. Добавив лишь один радиозонд,

который измеряет вертикальное электрическое поле, проводимость и скорость образования ионов, мы приобретаем целый набор новых параметров для исследования проблем солнечно-погодных связей. С помощью этих измерений можно изучать изменения во времени потенциала ионосферы и стратосферной проводимости для сравнения с характеристиками солнечно-земных явлений, которые регистрируются в повседневной практике, такими как солнечные вспышки, выбросы протонов, пересечения секторных границ и солнечный ветер.

Одной из целей указанных исследований можно считать определение тех частиц или условий межпланетного магнитного поля, которые могут вызвать отклики в планетарном электрическом контуре. Предполагается, что будет выполняться минимум одно зондирование с определением параметров атмосферного электрического поля в сутки в одно и то же время (вблизи минимума унитарного цикла, 03 00—04 00 UT), чтобы уменьшить влияние этой вариации. Зондирование можно было бы выполнять чаще (например, каждые два часа) непосредственно перед прогнозируемыми периодами солнечной активности и в течение нескольких дней после них, чтобы определить неизвестные времена распространения частиц в межпланетном пространстве. Запуски необходимо производить в особо подобранных местах, таких как Мауна-Лоа на Гавайях, где вершина горы в общем находится над наполненным помехами слоем перемешивания в средней части Тихого океана. Таким образом, зонды не должны запускаться над горными или загрязненными районами, которые влияют на ток проводимости атмосфера—земля и тем самым вносят погрешность в шаропилотное определение потенциала ионосферы [23].

Чтобы облегчить проведение статистических корреляций, было бы желательно получать непрерывные временные ряды за большие периоды, например 1 год или более. Кроме того, за год происходит около 30 пересечений границ солнечного сектора, что близко к минимальному числу, необходимому для достоверного статистического анализа. Вариации потенциала ионосферы составят «геоэлектрический индекс» в дополнение к геомагнитному. Этот индекс можно будет использовать аналогичным образом, чтобы соотнести вариации атмосферного электричества с параметрами, зависящими от солнечной активности. Обещающим было бы зондирование в нескольких широко разнесенных в пространстве местах с целью а) учесть неблагоприятные погодные условия на одной площадке и б) путем одновременных зондирований изучить разности ионосферного потенциала поперек области полярной шапки и от зоны полярных сияний к более низким широтам как функцию солнечной и геомагнитной активности.

Другой подход к регистрации потенциала ионосферы включает использование шара-пилота или змейкового аэростата, удерживаемого проводником, находящимся под высоким напряжением от источника питания постоянного тока [35]. Хотя и более усложненная и логистически трудная по сравнению с простым радиозондированием, эта методика позволяет непрерывно регистрировать потенциал ионосферы и другие вариации. Такое разрешение во времени может способствовать идентификации прямых эффектов, связанных с потоками частиц от Солнца или пересечениями секторных границ.

В отдельных экспериментах целесообразно исследовать возможное влияние на физические процессы в облаках солнечной активности и вариаций параметров атмосферного электричества. Такими экспериментами могут быть спутниковые микроволновые наблюдения пространственных и временных вариаций состояния жидкой воды и водяного пара в атмосфере [36]. Изменение числа молний в планетарном масштабе (как меры грозовой активности) легче всего установить по оптическим измерениям со спутников [37—39].

Ведя непрерывные наблюдения за Солнцем, солнечным ветром, межпланетным магнитным полем, частицами, попадающими в атмосферу, откликами атмосферного электричества и физическими параметрами облаков, мы будем в состоянии обнаружить причинную связь, в соответствии с которой изменение солнечной активности влияет на погоду.

Многие исследователи предоставили свою информацию и приняли участие в обсуждении различных частей этой работы. В особенности мне хочется поблагодарить Х. Андерсона, Р. Андерсона, Э. Беринга, Х. Долежалека, Р. Холцворта, М. Лесбриджа, М. Мюира, Р. Олсона, У. Робертса, Р. Робла, Р. Шапиро, С. Силвермена, Б. Воннегата и Дж. Уилкокса. Поддержка этому исследованию была обеспечена благодаря Дж. Хьюджесу — Программа атмосферных исследований, Бюро военно-морских исследований, контракт N 00014-74-C-0336.

Литература

1. *Wilcox J. M.* Space Sci. Rev., 8, 258, 1968.
2. *Markson R. J.* Symp. Elect. Processes and Problems in the Stratosphere and Mesosphere, IAGA Meeting, Madrid, 1969; Pure Appl. Geophys., 84, 161, 1971.
3. *Lethbridge M. D. J.* Geophys. Res., 75, 5149, 1970.
4. *Hundhausen A. J.* Coronal holes and high speed wind streams, ed. by J. B. Zirker, Colo. Assoc. Univ. Press, 1977.
5. *Wilcox J. M., Scherer P. H., Svalgaard L., Roberts W. O., Olson R. H.* Science, 180, 185, 1973.
6. *Roberts W. O., Olson R. H.* Rev. Geophys. Space Phys., 11, 731, 1973.

7. *Wilson C. T. R.* Proc. Roy. Soc. A, **92**, 555, 1916.
8. *Gish O. H., Wait G. R.* J. Geophys. Res., **55**, 473, 1950.
9. *Vonnegut B., Moore C. B., Espinola R. P., Blau H. H.* J. Atmos. Sci., **23**, 764, 1966.
10. *Stergis C. G., Rein G. C., Kangas T. J.* Atmos. Terr. Phys., **11**, 83, 1957.
11. *Bauer L. A.* Terr. Magn. Atmos. Elec., **29**, 23, and 161, 1924.
12. *Cooper F. L.* Am. J. Sci., **240**, 584, 1942.
13. *Olson D. E.* Symp. Influence of Solar Activity and Geomagnetic Changes on Weather and Climate, IAGA/IAMAP Joint Ass'y, Seattle, 1977.
14. *Reiter R.* Pure Appl. Geophys., **72**, 259, 1969.
15. *Reiter R.* Pure Appl. Geophys., **86**, 142, 1971.
16. *Cobb W. E.* Month. Weather Rev., **95**, 905, 1967.
17. *Markson R. J.* Possible Relationships between Solar Activity and Meteorological Phenomena, NASA Rept. SP-366, ed. by W. R. Bandeen and S. P. Maran, Govt. Printing Office, Washington, D. C., 1975.
18. *Markson R. J.* Nature, **273**, 103, 1978.
19. *Svalgaard L.* J. Geophys. Res., **77**, 4027, 1972.
20. *Мансуров С. М.* Геоманетизм и аэрономия, **9**, 622, 1969.
21. *Markson R. J.* Symp. High Atmosphere and Space Problems of Atmospheric Electricity, Gen. Sci. Ass'y, IUGG, Grenoble 1975.
22. *Silverman S.* Symp. High Atmosphere and Space Problems of Atmospheric Electricity, Gen. Sci. Ass'y, IUGG, Grenoble, 1974.
23. *Markson R. J.* J. Geophys. Res., **81**, 1980, 1976.
24. *Anderson R. V.* J. Geophys. Res., **74**, 1697, 1969.
25. *Kasemir H.* Pure Appl. Geophys., **100**, 75, 1972.
26. *Holzworth R. H., Mozer F. S.* J. Geophys. Res., in press, 1978.
27. *Lockwood J. A., Webber W. R., Hsieh L. J.* Geophys. Res., **79**, 4149, 1974.
28. *Hake R. D., Pierce E. T., Viezee W.* Stratospheric Electricity. Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif., 1973.
29. *Winckler J. R.* J. Geophys. Res., **65**, 1331, 1960.
30. Correspondence between *L. C. Hale, R. J. Markson.* Nature, in press 1978.
31. *Chalmers J. A.* Atmospheric Electricity 2nd ed., Pergamon, London, 1967. [Имеется перевод: Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество.—Л.: Гидрометеониздат, 1974.]
32. *Grenet G.* Ann. Geophys., **3**, 306, 1947.
33. *Vonnegut B.* Proc. conf. atmos. elect. Paper 42, EFCRL, Bedford, Mass., 1955.
34. Дальнейшее рассмотрение физических эффектов в облаках и библиографию см. в [18].
35. *Vonnegut B., Markson R. J., Moore C. B.* J. Geophys. Res., **78**, 4526, 1973.
36. *Staelin D. H., Rosenkranz P. W., Barath F. T., Johnston E. J., Water J. W.* Science, **197**, 991, 1977.
37. *Vorpahl J. A., Sparroz J. G., Ney E. P.* Science, **169**, 860, 1977.
38. *Sparrow J. G., Ney E. P.* Nature, **232**, 540, 1971.
39. *Turman B. N., Edgar B. C.* Spring meeting of Amer. Geophys. Union Miami, Fla., 1978.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ АТМОСФЕРОЙ

Р. Дж. Робл, П. Б. Хейс

Для исследования электрической связи между верхней и нижней атмосферой используется квазистатическая модель глобального атмосферного электричества.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы было высказано допущение о том, что солнечно-земные связи проявляются через вариации в атмосферном электричестве, которые в свою очередь влияют на развитие и мощность гроз [1—5]. Измерения токов и градиентов потенциала в земной атмосфере указывают на связь атмосферного электричества с солнечными вспышками [6—9], геомагнитной и авроральной активностью [6, 9—11], пересечениями солнечной секторной границы [12, 13] и вариациями солнечного цикла [14, 15]. Эти обусловленные солнечными процессами и явлениями в верхней атмосфере вариации атмосферного электричества накладываются на сложные вариации, связанные с метеорологическими и антропогенными процессами в нижней атмосфере [15].

Для исследования электрических процессов в нижней атмосфере и влияния солнечной активности и процессов в верхней атмосфере на планетарный электрический контур мы построили квазистатическую модель планетарного атмосферного электричества [16]. В этой статье мы приводим обзор основных характерных особенностей модели и обсуждаем результаты, полученные к настоящему времени при изучении процессов, определяемых солнечно-земными связями.

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Численная модель планетарного атмосферного электричества, используемая для изучения электрической связи между верхней и нижней областями атмосферы Земли, детально опи-

R. G. Roble. National Center for Atmospheric Research Boulder, CO-80307 USA.

P. B. Hays. Space Physics Research Lab., University of Michigan, Ann Arbor, MI-48105 USA.

сана в работах [16, 17]. Общая схема глобальной квазистатической модели представлена на рис. 1. Предполагается, что грозы представляют собой точечные дипольные генераторы тока, положительные полюса которых расположены на вершине облака, а отрицательные — на несколько километров ниже. В районах с ясной погодой, удаленных от областей с грозовой активностью, распределение электростатического потенциала

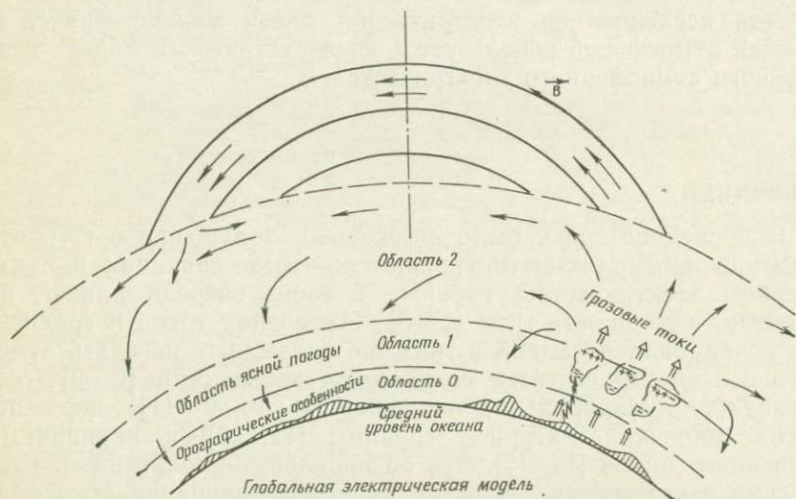


Рис. 1. Схема глобальной модели атмосферного электричества.

над Землей определяется возвратными токами от источников к земной поверхности. Геометрия модели, основанной на атмосфере, разделенной на четыре примыкающих друг к другу области, показана на рис. 1. Область 0 представляет собой часть атмосферы ниже границы тропосферы, в которой проводимость меняется и в горизонтальном, и в вертикальном направлениях; этот сектор включает в себя также земную орографию. Область 1 включает верхнюю тропосферу и отрицательные полюса источников тока в грозе, а область 2 — стратосферу и мезосферу над положительным полюсом грозовых источников тока. Электрическая проводимость в областях 0, 1 и 2 принимается изотропной. Ионосфера и магнитосфера образуют область 3, где проводимость анизотропна и где магнитно-сопряженные области связаны вдоль линий геомагнитного поля через магнитосферу. Математические детали модели, граничные условия и условия согласования между различными областями описаны в работе [16].

Используемые в модели зависимости электрической проводимости от высоты над земной поверхностью и широты мест-

ности показаны на рис. 2, а и б соответственно. Вертикальные профили сопоставляются с измерениями, выполненными в работах [18] — профиль 1, [19] — 2, [20] — 3, [21] — 4 и [22] — 5. Мы принимаем, что электрическая проводимость в верхней атмосфере поддерживается космическими лучами, интенсивность которых меняется примерно в 2 раза между экватором и полюсом [15]. Ввиду того что проводимость обусловлена главным образом малыми подвижными ионами, она зависит как корень квадратный от скорости образования ионов под воздействием космических лучей. На рис. 2 показаны также предполагаемые вариации электрической проводимости, обусловленные внезапным увеличением ионизации от космических лучей после солнечной вспышки и последующим ее уменьшением из-за эффекта Форбуша. В модели предполагается, что каждая гроза содержит точечный источник положительного электричества в верхней части грозового облака и равный ему отрицательный источник в нижней его части. В планетарном масштабе в рассматриваемой модели нет других источников тока, и грозы, таким образом, действуют, как насосы, перекачивая ток из нижней в верхнюю атмосферу. Мы произвольно принимаем, что на 19 00 по всемирному времени (19 00 UT) имеют место 2000 отдельных точечных гроз, которые случайно распределены по широте и долготе в соответствии с почасовой вероятностью появления гроз, выведенной в работе [24]. В модели рассмотрен сезон, соответствующий летним месяцам в северном полушарии, поэтому на 19 00 UT максимальные величины ионосферного потенциала и грозовой активности прихо-

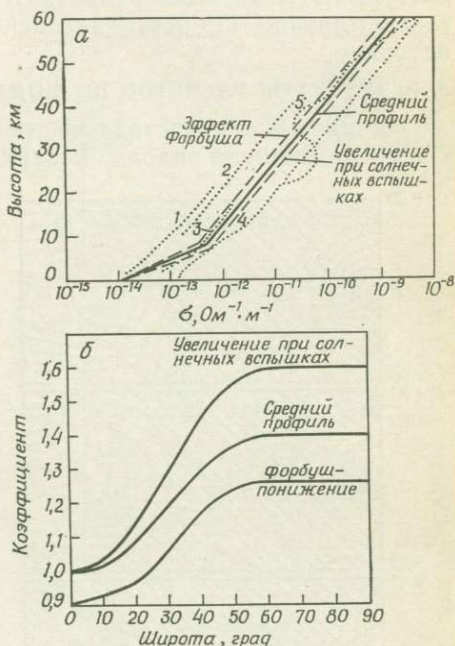


Рис. 2. Принятые в модели зависимости электрической проводимости от а — высоты над уровнем моря и б — широты местности. Показаны вариации профилей, обусловленные увеличением проводимости при солнечных вспышках и последующем форбуш-понижении.

ему отрицательный источник в нижней его части. В планетарном масштабе в рассматриваемой модели нет других источников тока, и грозы, таким образом, действуют, как насосы, перекачивая ток из нижней в верхнюю атмосферу. Мы произвольно принимаем, что на 19 00 по всемирному времени (19 00 UT) имеют место 2000 отдельных точечных гроз, которые случайно распределены по широте и долготе в соответствии с почасовой вероятностью появления гроз, выведенной в работе [24]. В модели рассмотрен сезон, соответствующий летним месяцам в северном полушарии, поэтому на 19 00 UT максимальные величины ионосферного потенциала и грозовой активности прихо-

дятся на области над Центральной Америкой, Флоридой, Скалистыми горами, бассейном Амазонки и частью Центральной Африки. В модели предполагается, что на 1900 UT случайно распределены по широте и долготе 600, 100, 1000, 280 и 20 гроз в Африке, Азии, Центральной Америке, Аргентине и Альпах соответственно. По вертикали центры гроз распределены также случайно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО МОДЕЛИ

На рис. 3, в представлены результаты расчетов электрического потенциала вдоль поверхности равной проводимости с $\sigma = 7,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, которая находится на высоте примерно 25 км над экватором и снижается до 23 км к обоим полюсам. Рассчитанный для условий ясной погоды ионосферный потенциал равен $\phi_{\infty} = -291\,000 \text{ В}$, а на рис. 3 графически представлены значения $\phi - \phi_{\infty}$ вдоль поверхности равной проводимости. Над грозовыми районами Центральной Америки, Африки и Аргентины значения $\phi - \phi_{\infty}$ положительны, и линии электрического тока направлены из областей с грозовой активностью в ионосферу. Максимальное значение $\phi - \phi_{\infty}$ равно 16 000 В, тогда как минимальные значения, приходящиеся на горные районы с ясной погодой, составляют -5700 В как над Тибетом, так и над Антарктидой*. На рис. 3, б показаны расчетные значения $\phi - \phi_{\infty}$ вдоль поверхности с $\sigma = 4,74 \times 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, находящейся на высоте примерно 50 км над экватором. Распределение потенциала на этой высоте более

Рис. 3. Изолинии расчетной разности потенциалов ($\phi - \phi_{\infty}$) вдоль различных поверхностей равной проводимости на высотах примерно: а — 105 км, б — 50 км и в — 25 км. Все значения ($\phi - \phi_{\infty}$), умноженные на 10^{23} , выражены в вольтах.

Рис. 3. Изолинии расчетной разности потенциалов ($\phi - \phi_{\infty}$) вдоль различных поверхностей равной проводимости на высотах примерно: а — 105 км, б — 50 км и в — 25 км. Все значения ($\phi - \phi_{\infty}$), умноженные на 10^{23} , выражены в вольтах.

* Эти значения $\phi - \phi_{\infty}$ на порядок отличаются от указанных на рис. 3, в.—
Прим перев.

однородно, чем распределение на высоте 25 км, в том числе — в районах со значительной грозовой активностью. На рис. 3, а показаны изолинии расчетных значений $\phi - \phi_\infty$ вдоль поверхности равной проводимости с $\sigma_m = 4,54 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, которая представляет собой основную магнитосферу (область 3 модели) на высоте примерно 105 км. Потенциал ϕ_∞ представляет собой среднепланетарное значение на этой поверхности. Максимальное значение $\phi - \phi_\infty$, которое приходится на область грозовой активности над Африкой, равно 975 В, а минимальное — 600 В над центром акватории Тихого океана.

В вышеприведенных модельных расчетах предполагается совпадение геомагнитного и географического полюсов. На геомагнитном экваторе линии поля горизонтальны, а вертикально направленные электрические токи имеют запрет на боковое рассеяние. В этой области образуется максимальная величина потенциала. В Центральной Америке область грозовой активности смещена до геомагнитного экватора, и поэтому линии тока направлены из области грозовой активности вдоль линий геомагнитного поля в сопряженную полусферу. Степень возмущения потенциала при этом ослабевает по мере перехода к более низким высотам в сопряженной полусфере.

На рис. 4, а показаны изолинии расчетного потенциала ϕ вдоль поверхности равной проводимости с $\sigma_1 = 4,3 \cdot 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \times \text{м}^{-1}$, которая соответствует в районе экватора высоте примерно 8 км. Под каждой областью грозовой активности потенциал существенно отрицателен. Минимального значения в несколько миллионов вольт потенциал достигает под грозовым районом Центральной Америки. В районах с ясной погодой, удаленных от грозовых областей, расчетный потенциал поло-

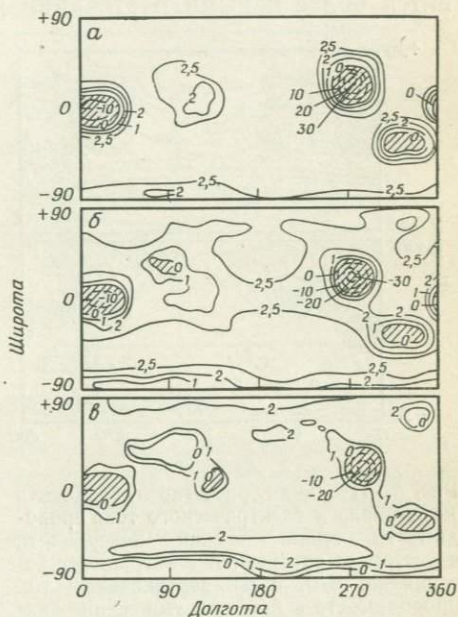


Рис. 4. Изолинии расчетного потенциала ϕ вдоль различных поверхностей равной проводимости на высотах примерно: а — 8 км, б — 4 км и в — 2 км. Все значения ϕ , умноженные на 10^5 , выражены в вольтах.

жителен относительно земной поверхности, указывая на наличие возвратных к земле токов. На рис. 4, б и в показаны рассчитанные изолинии потенциала на высотах 4 и 2 км соответственно. В общих чертах они подобны рис. 4, а, но на меньших высотах возмущающие эффекты земной орографии становятся более явными. Потенциал равен нулю, когда рассматри-

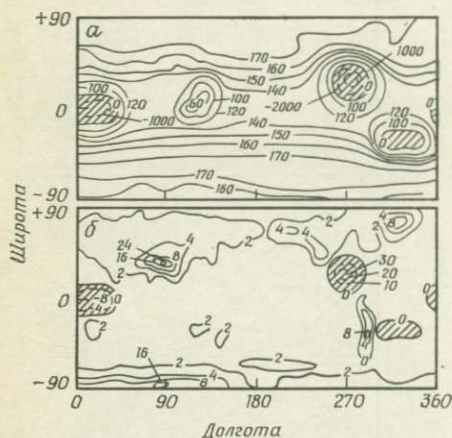


Рис. 5. Изолинии расчетного градиента потенциала и электрического тока проводимости вдоль земной поверхности с учетом ее орографии: а — градиент потенциала, В/м, и б — вертикальный ток проводимости в А/м² при умножении значений на рисунке на 10⁻¹¹.

значение тока проводимости имеют место в Гималаях и других высокогорных районах. Это связано с высокой проводимостью на уровне вершин гор и влиянием орографии на искривление электрического потенциала и усиление электрического поля. Ток, направленный к земле в районах с ясной погодой, уравнивается током от земной поверхности в областях с грозовой активностью, не оставляя никаких других токов в планетарном масштабе. Электрическое поле на уровне моря составляет 134 В/м на экваторе и 173 В/м в районе полюсов, что хорошо сходится с измерениями, проведенными в экспедиции на судне «Карнеги»: 120 В/м на экваторе и 155 В/м на широте 60° [15]. В табл. 1 параметры рассматриваемой модели сравниваются с оценкой параметров планетарной электрической цепи, выполненной в работе [14]. Имеются значительные неопределенности в планетарных оценках, тем не менее результаты сравнения можно считать обнадеживающими.

ваемая поверхность пересекает высокую гору, возвышающуюся над ней; поэтому потенциал сильно искажается, когда поверхность равной проводимости оказывается вблизи таких орографических структур, как Антарктида, Гренландия или Гималаи. На высоте 2 км (рис. 4, в) начинают проявляться контуры континентов.

На рис. 5, а и б представлены изолинии рассчитанных по модели градиента потенциала и вертикального тока проводимости вдоль земной поверхности с учетом ее орографии. Наиболее высокие положительный градиент электрического потенциала и

Таблица 1

Сравнение оценок характеристик планетарного электрического контура по данным работы [14] и модельных расчетов в этой работе

	Работа [14]	Модель
Количество гроз	1500—1800	2000
Среднее значение силы тока на одну грозу	0,5—1,0 А	0,51 А
Суммарная планетарная сила тока	800—1800 А	1065 А
Ионосферный потенциал	180—400 кВ (диапазон)	291 кВ
Сопротивление столба атмосферы	278 кВ (среднее) $1,3 \cdot 10^{17}$ Ом·м ²	$1,39 \cdot 10^{17}$ Ом·м ²
Полное сопротивление	230 Ом	273 Ом

4. ВАРИАЦИИ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Изменения интенсивности потока космических лучей, бомбардирующих Землю во время и после солнечных вспышек, детально описаны Форбушем в работе [23]. В наших расчетах мы используем две фазы изменения проводимости, которые показаны на рис. 2. Во время солнечной вспышки на уровне земли наблюдается быстрое увеличение интенсивности (солнечных) космических лучей, которое обычно длится от 0,5 до 1 ч. В этот период интенсивность на уровне земли может увеличиваться от 5 до 50 % — в зависимости от интенсивности и энергетического спектра распределения частиц. Это увеличение имеет широтную зависимость — от наибольших значений на полюсах до наименьших на экваторе. Вслед за вспышкой происходит быстрое увеличение проводимости, а затем в соответствии с эффектом Форбуша наступает повсеместное уменьшение интенсивности космических лучей, которое может продолжаться от одних до нескольких суток.

Основные расчетные планетарные характеристики электричества во время солнечных вспышек и после них и те же характеристики для основного варианта расчетной модели сведены для сравнения в табл. 2. Расчетное планетарное электрическое сопротивление уменьшается с 273 до 247 Ом в период солнечной вспышки (вследствие увеличения интенсивности космических лучей) и затем увеличивается до 303 Ом во время эффекта Форбуша. Расчетный ионосферный потенциал уменьшается с 291 000 до 244 000 В при увеличении интенсивности космиче-

Таблица 2

Расчетные параметры планетарного электрического контура для основного варианта модели (на 19 00 UT) и вариаций, связанных с солнечными вспышками

	Ионосферный потенциал, В	Планетарная сила тока, А	Приземный градиент потенциала, В/м		Планетарное сопротивление, Ом
			экватор	полюс	
Основной вариант	291 000	1065	134	173	273
Солнечная вспышка	244 000	988	113	166	247
Форбуш-понижение	323 300	1063	148	192	303

ских лучей, но затем возрастает до 323 300 В в процессе последующего форбуш-понижения. Суммарный планетарный электрический ток сначала уменьшается с 1065 до 988 А, а затем увеличивается до 1063 А по тем же причинам. Приземное электрическое поле как на экваторе, так и на полюсах также меняется — сначала уменьшается, а затем увеличивается. Все эти расчеты указывают на то, что изменения электрической проводимости, связанные с солнечными вспышками, способны оказать влияние на планетарный электрический контур. В реальных представлениях о проводимости в планетарных масштабах в периоды солнечных вспышек имеется много неопределенностей, и мы подчеркиваем, что эти расчеты были сделаны лишь для того, чтобы проиллюстрировать возможное влияние солнечно-земных связей на структуру атмосферного электричества. Это исследование не следует рассматривать как подробный расчет для конкретного события.

5. ГЕОМАГНИТНЫЕ СУББУРИ

В районе полюсов Земли существуют двухъячейстые конвективные токи магнитосферной плазмы, которые связаны с горизонтальным распределением потенциала на высотах ионосферы. В области полярной шапки наблюдается разность потенциалов между рассветной и сумеречной ее сторонами, которая меняется от 50 до 250 кВ в зависимости от геомагнитной активности. На экваториальной стороне полярной шапки примерно с магнитной широты 75° в авроральной зоне, как полагают, потенциал линейно возрастает до среднепланетарного значения

потенциала ионосферы. По оценкам работы [4], горизонтальные крупномасштабные компоненты электрического поля эффективно проникают к Земле и вызывают там вариации градиента потенциала. В наших расчетах мы учитываем эффекты земной орографии и смещенность географического и геомагнитного полюсов. Положительные и отрицательные возмущения потенциала в высоких широтах, воздействующие на потенциал верхней границы ионосферы, вызывают соответственно нисходящие и восходящие относительно Земли токи. Ввиду того что в модели заложено требование равенства нулю дивергенции токов, любое изменение баланса в системе восходящих и нисходящих токов должно быть компенсировано в планетарном контуре, вызывая изменения потенциала ионосферы. Такое нарушение баланса может произойти, когда положительный (отрицательный) ток располагается над Антарктидой, где поверхностная проводимость высокогорного плато велика, в то время как отрицательный (положительный) ток протекает над покрытым облаками океаном, где поверхностная проводимость низка. Для отдельных больших геомагнитных суббурь, у которых верхняя граница распределения потенциала соответствующим образом расположена над континентом и океаном, нарушение баланса токов может потребовать изменения потенциала ионосферы до 5—10 % его величины, что осуществляется за счет грозовой активности. Взаимодействие других генераторов тока верхней атмосферы с нижней атмосферой рассмотрено в работе [17].

Литература

1. Markson R. Pure Appl. Geophys., **84**, 161, 1971.
2. Markson R. Nature, **273**, 103, 1978.
3. Herman J. R., Holdberg R. A. J. Atmos. Terr. Phys., **40**, 121, 1978.
4. Park C. G. J. Geophys. Res., **81**, 168, 1976.
5. Sartor D. Problems of Atmospheric and Space Electricity, S. C. Coroniti, Ed., Elsevier Pub. Co., Amsterdam, 307, 1965.
6. Cobb W. E. Mon. Weather Rev., **95**, 905, 1967.
7. Reiter R. Pure Appl. Geophys., **72**, 259, 1969.
8. Reiter R. Pure Appl. Geophys., **86**, 142, 1971.
9. Reiter R. Pure Appl. Geophys., **94**, 218, 1972.
10. Olson D. E. Pure Appl. Geophys., **84**, 118, 1971.
11. Lobodin T. V., Paramonov N. A. Pure Appl. Geophys., **100**, 167, 1972.
12. Park C. G. Geophys. Res. Lett., **3**, 475, 1976.
13. Reiter R. Electrical Processes in Atmospheres, H. Dolezalek and R. Reiter, Eds., Steinkopff Verlag, Darmstadt, 759, 1977.
14. Muhleisen R. P. Electrical Processes in Atmospheres, H. Dolezalek and R. Reiter, Eds., Steinkopff Verlag, Darmstadt, 450, 1977.
15. Israel H. Atmospheric Electricity, Vol. 1 and 2, Natl. Tech. Info. Service, Springfield, VA, 1971.
16. Hays P. B., Roble R. G. J. Geophys. Res., submitted, 1978.
17. Roble R. G., Hays P. B. J. Geophys. Res., submitted, 1978.

18. *Morita Y., Ishirawa H., Kanada M. J.* Geophys. Res., **76**, 3431, 1971.
19. *Sagalyn R. C.* U.S. Air Force Handbook of Geophysics, McMillan, 1960.
20. *Mozer F. S., Serlin R. J.* Geophys. Res., **74**, 4739, 1969.
21. *Cole R. K., Jr., Pierce E. T. J.* Geophys. Res., **70**, 2735, 1965.
22. *Tran A., Polk C.*, report to Air Force Cambridge Labs, on contract F-19628-70-C-0090, U. of Rhode Island, Dept. of Electrical Engineering, August 1972.
23. *Forbush S. E.* Handbuch der Physik, Geophysik III, J. Bartels, Ed., Springer-Verlag, New York, 1966.
24. *Chrichlow W. Q., Davis R. C., Disney R. C., Clark M. W.* Office of telecommunications/ITS research report 12, Boulder, CO, April 1971.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ МЕЖДУ ИОНОСФЕРОЙ И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Р. Рейтер

Начиная с 1954 г. на высокогорной станции (высота 3 км) мы регистрируем напряженность электрического поля E , плотность вертикального тока в атмосфере I и некоторые другие электрические и метеорологические параметры. В 1960 г. мы смогли показать, что через 2—4 сут после солнечной вспышки E и I одновременно и существенно увеличиваются, но лишь в том случае, когда их регистрируют над слоем перемешивания в абсолютно ясную погоду. Были тщательно обработаны ряды данных за период с 1964 по 1975 г., т. е. за 12 лет. Показано, что через 1—2 сут после прохождения границы секторной структуры ММП типа $-/+$ величины E и I уверенно увеличиваются на 20—30 % (ясная погода, над слоем перемешивания). При прохождениях типа $+/-$ рост величин E и I выражен слабее (15 %), а максимум обнаруживается именно в день прохождения. Совпадение по фазе в изменениях E и I над слоем перемешивания характерно для электрического потенциала ионосферы.

В этой статье приводится обзор исследований, проведенных в нашем институте и относящихся к обсуждаемым вопросам. В 1954 г. на двух соседних горных пиках были оборудованы станции для регистрации напряженности электрического поля E и вертикальной плотности тока из атмосферы к Земле I , а также некоторых других параметров атмосферного электричества, метеорологии и физики аэрозолей. На рис. 1 показаны первые результаты исследований солнечно-земных связей [1]. Они основаны на примерно пятилетних наблюдениях, проведенных в периоды увеличения и максимума солнечной активности. Ввиду большой частоты вспышек в эти периоды мы выбрали лишь те дни, в которые было по крайней мере две вспышки балла ≥ 2 . Кроме того, была необходима совершенно ясная погода, чтобы вблизи станции отсутствовали активные генераторы электрических зарядов (вихревые движения кристалликов льда или пыли), чтобы станция была расположена над слоем перемешивания, т. е. чтобы 50—70 % сопротивления воздуха было ниже уровня станции [2], вследствие чего местная

R. Reiter. Institute for Atmospheric Environmental Research of the Fraunhofer Society, D-8100 Garmisch-Partenkirchen, West Germany.

проводимость воздуха была бы близка к постоянной. При наличии всех этих условий появляется возможность получить репрезентативные в глобальном масштабе данные по E и I .

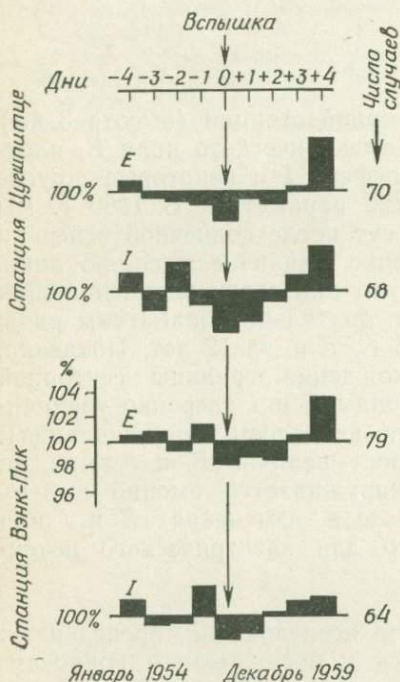


Рис. 1. Первые результаты наблюдений напряженности электрического поля E и плотности тока в земной атмосфере I , обработанные методом наложенных эпох относительно моментов солнечных вспышек в линии H_{α} . Использованы наблюдения за период с 1954 по 1959 г. в дни с исключительно ясной погодой на высокогорной обсерватории Цугшпитце (2964 м над уровнем моря), расположенной над слоем перемешивания [1].

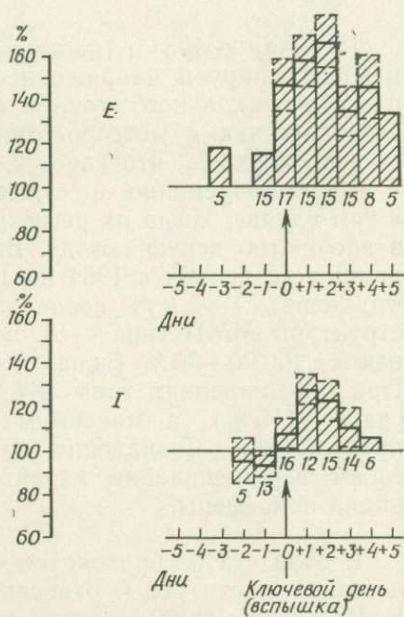


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но наблюдения проведены в период с февраля 1967 по май 1969 г., а выбор солнечных вспышек (всего 80 [5]) ограничен частью солнечной поверхности между $20^{\circ}E$ и $20^{\circ}W$ в гелиографических координатах. Пунктирными линиями обозначен уровень статистической значимости.

Наряду с измерениями на высокогорных станциях для этой цели пригодны наблюдения в полярных зонах [3], на островах в океане [4] и на кораблях (например, известная серия измерений «Карнеги»).

На рис. 1 показано [5], что E и I возрастают на обеих станциях от дня вспышки до 4 сут после нее. Совпадение

минимумов или максимумов для 4 серий независимых данных, состоящих каждая из 9 групп (от -4 до $+4$ сут, считая от дня вспышки), случайно попадающих в одну и ту же группу (сутки), имеют вероятность лишь $0,015\%$. Следовательно, полученный результат является значимым и показывает, что электрический потенциал ионосферы увеличивается после солнечных вспышек. Подобное исследование было повторено позже (рис. 2) и привело качественно к тому же результату, однако с некоторыми отличиями: максимум наблюдался на второй или третий день после вспышки, а увеличение E и I составляло от 30 до 60% (уровень значимости пунктирными линиями). Основное отличие состояло в более заметном увеличении E и I , что было связано с использованием только «активных» вспышек между 20°W и 20°E в гелиографических координатах. Результаты, изображенные на рис. 1 и 2, находятся в удовлетворительном согласии с результатами аналогичных измерений, выполненных Коббом [4] в Мауна-Лоа.

Вдохновленные исследованиями Уилкокса и др. [6], мы стали наконец наши дальнейшие исследования изменчивости E и I (однородные данные более чем за 12 лет) сопоставлять с прохождениями границы секторной структуры межпланетного магнитного поля (рис. 3). Диаграммы a и b на рис. 3 показывают изменения E и I за весь период исследований для прохождений $-/+$ и $+/-$ соответственно. Ход изменений вблизи ключевых дней (дней со вспышками) внутри значимого диапазона (вертикальные отрезки) совпадает для E и I : максимум наступает через $+1$ сут после $-/+$ и точно в ключевой день $-$ при измененной полярности $+/-$. Если используемые данные ограничить периодом максимума солнечной активности (т. е. вместо 170 использовать 77 и 80 сут), то мы получим диаграммы, представленные на рис. 3, v и g . Несмотря на уменьшение общего числа случаев, амплитуда и значимость, как видно, существенно возросли для полярности изменения $-/+$ (до 20%). В этом случае мы также использовали наблюдения в дни с исключительно ясной погодой на станции, находившейся над слоем перемешивания. Полученные результаты благодаря одинаковому ходу изменения E и I с очевидностью показывают, что электрический потенциал ионосферы подвержен воздействию солнечных вспышек. (Примечание. Парк [3] в Антарктиде в 17 случаях обнаружил уменьшение значения E после изменения полярности ММП; но в связи с тем, что при этом величина I не была измерена, нам не хватает существенного глобального репрезентативного критерия. Возможно, кроме того, что вблизи полюса преобладают другие атмосферно-электрические механизмы). В настоящее время по поводу причин, вызывающих приведенные корреляции, нельзя сделать

однозначного заключения. Имеется одно приемлемое объяснение, и против него к данному моменту не выдвинуто аргументов.

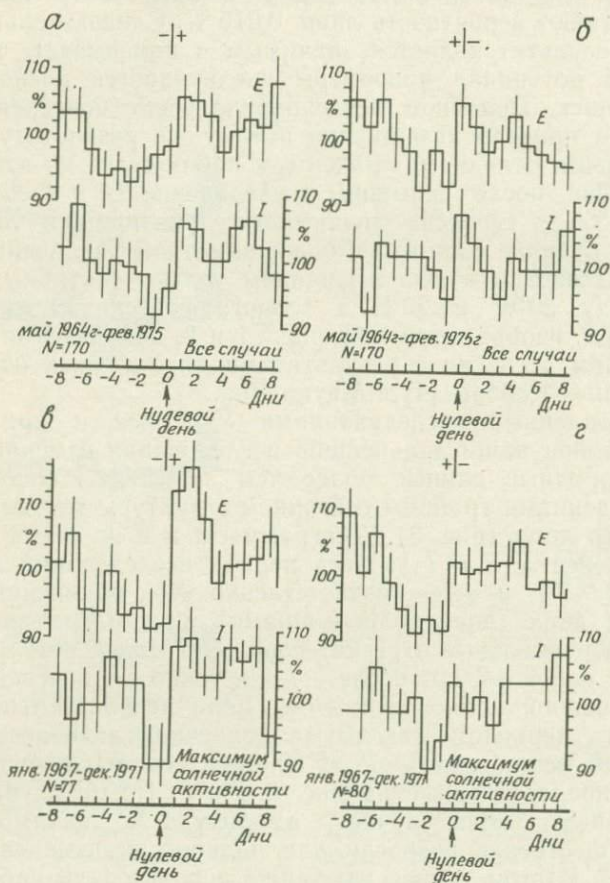


Рис. 3. Анализ E и I методом наложенных эпох, где ключевыми днями являются дни прохождения границ секторной структуры с различной полярностью (+/-, -/+): a и $б$ — все данные за 12 лет (с мая 1964 г. по февр. 1975 г. — всего 170 ключевых дней), $в$ и $г$ — период максимальной солнечной активности с янв. 1967 г. по дек. 1971 г. ($в$ — 77 дней и $г$ — 80 ключевых дней).

Электрический потенциал ионосферы поддерживается в основном совокупной активностью всех гроз на Земле. Марксон [7] довольно давно обнаружил корреляцию между прохождением секторной структуры и частотой гроз на севере США: после -/+ прохождения индекс частоты гроз немного увели-

чивается, в то время как перед $+/-$ прохождением обнаруживается его минимум. Эти результаты не противоречат данным рис. 3, в и г, хотя такое сравнение оставляет сомнения, так как данные взяты за различные периоды и использована регистрация гроз лишь по небольшой части земной поверхности.

Тем не менее наши прежние исследования показали, что даже на площади всего в 1000 км диаметром на частоту гроз влияют солнечные вспышки. Это можно видеть из рис. 4 (ключевые дни аналогичны рис. 2) по увеличению частоты атмосферных радиопомех через $+2$ дня после солнечной вспышки (см. рис. 2). Этот результат, хорошо согласующийся с аналогичным исследованием Боссоласко [8], не связан с воздействием солнечной активности на распространение радиоволн, так как зона приема импульсов атмосферных радиопомех ограничена радиусом максимум в 500 км.

Трудно непосредственно подтвердить, что количество, продолжительность и мощность гроз на Земле увеличивается под воздействием солнечной активности (а следовательно, и потенциал ионосферы), так как грозовые или даже более мощные разряды между облаками и земной поверхностью не регистрируются непрерывно в планетарном масштабе. Общее распределение гроз известно из классических работ по климатологии [9] (рис. 5); известно также, что наиболее часто грозы имеют место в тропических зонах над континентами. Регистрация гроз со спутников могла бы подтвердить справедливость этой картины (рис. 6), однако пока еще недостаточно разрешение при регистрации гроз на земном шаре по месту, времени и интенсивности.

Мы попытались достичь некоторых результатов в этом направлении путем анализа суточных атмосферно-электрических вариаций E , I и L (L — электропроводность воздуха в пункте наблюдений) в периоды чрезвычайно благоприятных погодных условий на станции Цугшпитце. На рис. 7 отмечены моменты

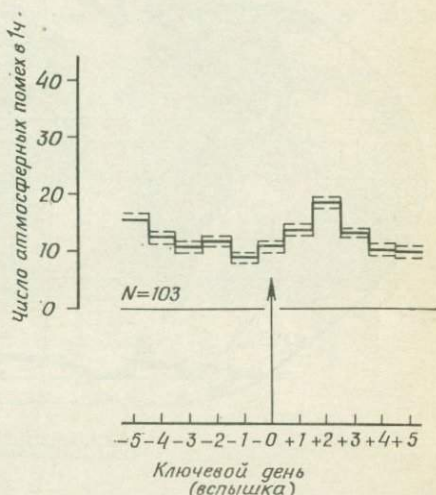


Рис. 4. Анализ частоты импульсов атмосферных радиопомех, выполненный методом наложенных эпох. Ключевые дни — солнечные вспышки (всего 103 случая). Все остальное аналогично рис. 2.

времени UT, в которые с наибольшей вероятностью происходит развитие грозовой активности над континентами (местное время

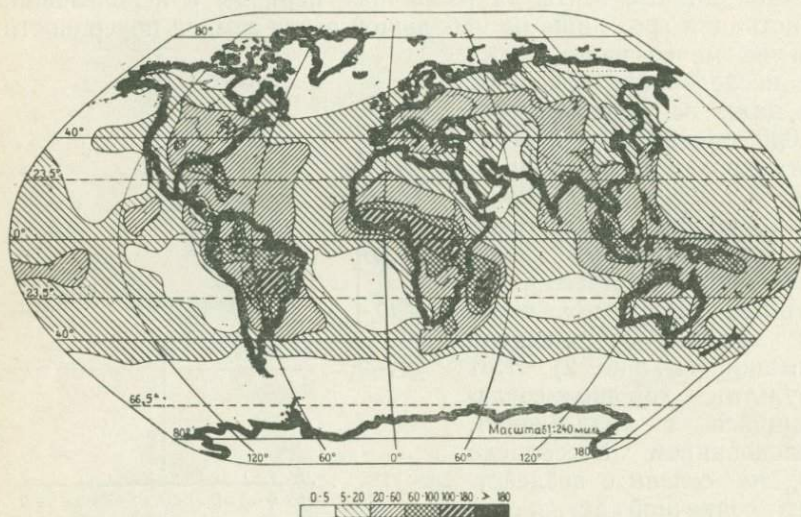


Рис. 5. Климатология распределения частоты гроз на земном шаре.



Рис. 6. Типичный пример распределения гроз на земном шаре по данным регистрации со спутника.

14 ч согласно [9]). Сначала мы усреднили суточный ход (пунктирные кривые на рис. 8) E , I и L для дней с ясной погодой, до и в течение которых солнечных вспышек не наблюда-

лось (рис. 8 — лишь отдельный пример этого анализа, более детально см. [10]). Затем мы усредняли суточные вариации E , I и L непосредственно после сильной вспышки (сплошные кривые на рис. 8) также в дни с исключительно ясной погодой. Интервал между этими двумя периодами не превышал нескольких месяцев. В проанализированных случаях при сравнимых и примерно постоянных во времени значениях L мы обна-

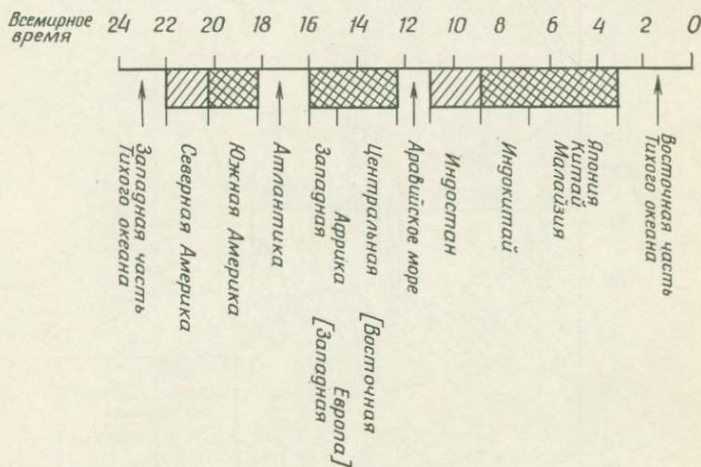


Рис. 7. Наибольшая вероятность грозовой активности над наиболее важными частями континентов, приведенная в зависимости от всемирного времени UT (местное время 14 ч).

ружили, что после солнечных вспышек не только возрастают среднесуточные значения E и I , но также обнаруживаются и соответствующие пики в суточном ходе E и (что важно) I , которые могут быть скоррелированы по времени с наиболее сильным солнечным облучением различных тропических зон (ср. рис. 7 и 8).

Отмеченные пульсации E и I в течение нескольких дней после вспышек хорошо заметны, если в дни с ясной погодой, которые свободны от эффектов солнечных вспышек, мы получаем чистый планетарный «суточный ход Карнеги» (пунктирные кривые E и I на рис. 8).

Хотя эти наблюдения и не могут быть использованы как точное доказательство, они свидетельствуют о возможном влиянии солнечной активности на ионосферный потенциал через частоту гроз в планетарном масштабе. Другие исследования

(рис. 9) также показывают, что мы можем предположить наличие метеорологического канала связи, например управле-

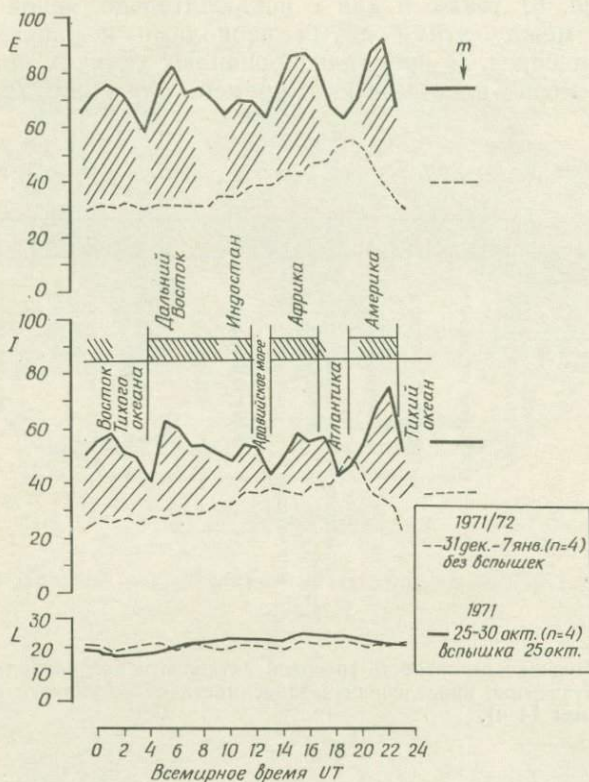


Рис. 8. Суточный ход E и I в дни с очень хорошей погодой над слоем перемешивания на высокогорной станции (3 км): первый (пунктирные кривые) — случай, когда вспышек на Солнце нет и проявляется обычный суточный ход по «Карнеги»; второй (сплошные кривые) — в дни после солнечной вспышки, когда средние значения (m) E и I (отрезки прямой справа) явно увеличиваются, а на суточном ходе проявляются пики, соответствующие повышенной частоте гроз (на рис. показана между кривыми для E и I) в районах, указанных на рис. 7.

ние стратосферно-тропосферным обменом, как следует из изменения содержания ^7Be в тропосфере (см. другую статью Рейтера в этом сборнике) или изменения индекса завихренности в зависимости от прохождения границ секторной структуры. Можно также показать, что солнечные вспышки влияют на

оправдываемость прогнозов погоды [11] в соответствии с [12]. Так, например, из рис. 10 хорошо видно, что при стратосфер-

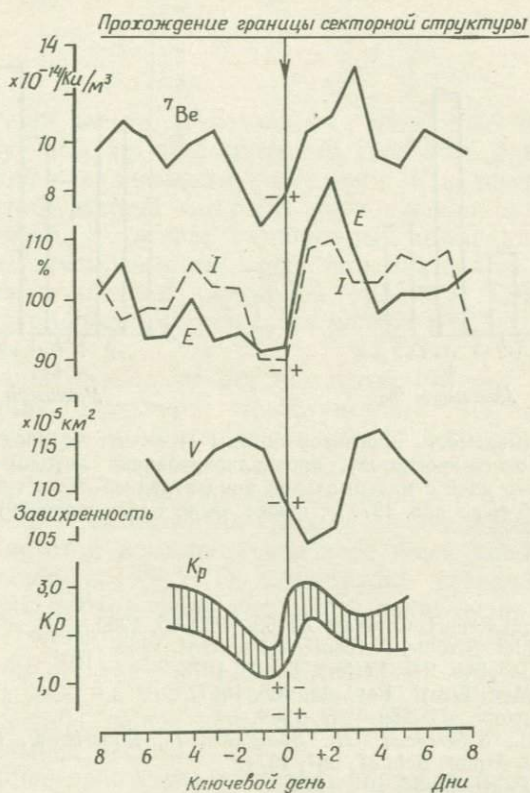


Рис. 9. Сравнительное сопоставление [14], выполненное методом наложенных эпох относительно дней прохождения границы секторной структуры, для следующих переменных величин (сверху вниз): концентрации ${}^7\text{Be}$ в тропосфере как меры интенсивности стратосферно-тропосферного обмена; величин E и I ; индекса завихренности V [6] и геомагнитной активности K_p [6].

ном вторжении, вызванном солнечной активностью (дни с максимальной концентрацией ${}^7\text{Be}$ в тропосфере), частота плохих прогнозов возрастает (рис. 10, а), в то время как частота хороших прогнозов падает (рис. 10, б).

В многочисленных публикациях (см., например, [13]) показано, что солнечные вспышки влияют на состояние нижней стратосферы. Поэтому разумно постулировать влияние Солнца

на электрический потенциал ионосферы [14] как механизм воздействия на метеорологические явления и этот вопрос изучить в дальнейших исследованиях.

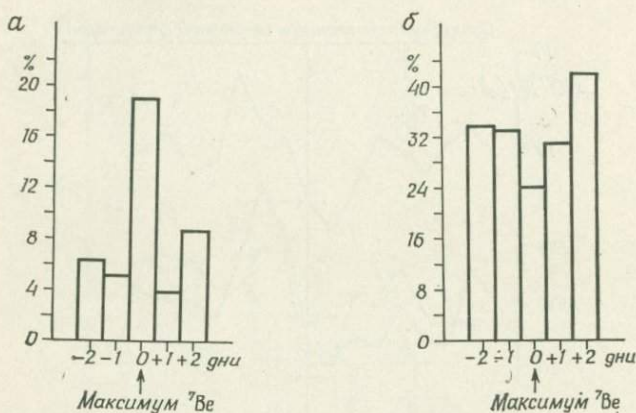


Рис. 10. Оправдываемость прогнозов погоды (а — частота плохих прогнозов, б — частота хороших прогнозов), проанализированная методом наложенных эпох относительно дней с максимальной концентрацией ${}^7\text{Be}$ в тропосфере (период с янв. 1975 г. по янв. 1977 г.; общее число наблюдений 79).

Литература

1. Reiter R. Final Report, Contract AF 62 (052)-55, 1960.
2. Reiter R. Felder, Ströme, Aerosole, Darmstadt, 1964.
3. Park C. G. Geophys. Res. Letters, 3, 475, 1976.
4. Cobb W. E. Mon. Weath. Rev., 95, 905, 1967.
5. Reiter R. Pageoph., 72, 259—267, 1969.
6. Wilcox J. M., Scherrer P. H., Svalgaard L., Roberts W. O., Olson R., Jenne R. L. J. Atmos. Sci., 31, 581, 1974.
7. Markson R. Pageoph., 84, 161, 1971.
8. Bossolasco, M., Dagnino I., Elena A., Flocchini G. 1st Univ. Navale di Napoli Meteorol. e Oceanogr., 213, 1972.
9. Blüthgen J. Allgemeine Klimageographie, Berlin, 1964.
10. Reiter R. Riv. Italiana di Geofisica XXIII, 193, 1974.
11. Reiter R. Iamap General Assembly, Seattle, 1977.
12. Larsen M. F., Kelley M. C. Geophys. Res. Letters, 4, 337, 1977.
13. King J. W. Aeronautics and Astronautics, 13, 10, 1975.
14. Reiter R. J. Atm. and Terr. Phys., 39, 95, 1977.

ЧАСТОТА ГРОЗ И СОЛНЕЧНЫЕ СЕКТОРНЫЕ ГРАНИЦЫ

М. Д. Лесбридж

Использован метод наложенных эпох для исследования связи между частотой повторяемости гроз над северными штатами Америки и солнечными явлениями. В качестве ключевых дней для этого метода выбрано прохождение секторной границы и найдено, что в трех независимых выборках максимальная частота повторяемости гроз приходится на день после прохождения солнечной секторной границы. Статистическая значимость этой связи оказалась на уровне 1 %.

В последние несколько лет заметный интерес стала вызывать секторная структура межпланетного магнитного поля (ММП), особенно моменты прохождения секторной границы, когда имеют место вариации скорости солнечного ветра, плотности, магнитных и геомагнитных индексов и т. д.

Возможность взаимосвязи между прохождением границ сектора с частотой повторяемости гроз была впервые предложена Марксоном в 1969 г. Он обнаружил увеличение частоты гроз во время прохождения секторной границы при изменении полярности солнечного поля от $+$ к $-$ [1]. Вслед за этим Уилкоккс и др. [2] указали на уменьшение индекса завихренности (VAI) как на меру интенсивности циркуляции синоптического масштаба через день после прохождения секторной границы в зимние месяцы.

В настоящей работе мы исследовали статистическую взаимосвязь между частотой повторяемости гроз и солнечными секторными границами. Индекс частоты гроз был вычислен по данным, собранным от атлантического побережья Соединенных Штатов до 102° з. д. от 30 до 45° с. ш. Использовались данные измерений на 102 станциях за 11 лет (1966—1976 гг.). Эти данные были разделены на три широтных интервала: $30-35^\circ$, $35-40^\circ$ и $40-45^\circ$. В качестве переменной использовался корень кубический из частоты гроз по ежедневным данным за 11 лет для каждого широтного интервала в отдельности и всего рассматриваемого широтного диапазона в целом. Усредненные значения корня кубического за 11 лет были сглажены и вычтены из непосредственно измеренных значений для того, чтобы

устранить какие-либо сезонные эффекты. Это позволило получить индекс, который изменялся приблизительно от -3 до $+3$.

Чтобы убедиться, имеют ли влияние прохождения секторной границы на образование гроз, были использованы для ключевых дней в методе наложенных эпох даты Свалгаарда [3] по секторным границам, а в качестве переменной взят индекс грозовой активности. Сначала в качестве ключевых дней использовались данные по границе для целого года, что за 11 лет составило 330 случаев. Никаких значимых результатов получено не было, и кривые казались случайными.

В работе Уилкокса и др. [2], возможно, найдена взаимосвязь между секторной границей и индексом завихренности только для зимних месяцев, поэтому нами также был сделан анализ ключевых дней только с ноября по март. Для всей области исследования никаких значимых максимумов обнаружено не было, но для широтной полосы $40-45^\circ$ с. ш. существовал максимальный пик на $+1$ день, который оказался значимым. Затем данные были разделены по ключевым дням для полярности секторной границы, изменяющейся от $+k$ — и от $-k$ +.

Для обеих независимых выборок данных грозовая активность оказалась относительно высокой в день, следующий за прохождением секторной границы (рис. 1). Однако наблюдаемые в эти дни пики не были статистически значимыми. Другие пики, изображенные на рис. 1, наблюдаемые в дни с другим запаздыванием, были почти такими же большими, как и в случае $+1$ дня. Результаты, приведенные на рис. 1, были использованы для подтверждения рабочей гипотезы о том, что в США появление гроз на широтах $40-45^\circ$ наиболее вероятно на следующий день после прохождения секторной границы при изменении ее полярности от $+k$ —.

На рис. 2 показана проверка гипотезы, основанная на двух дополнительных выборках данных, длиной в 10 лет каждая. Рисунок иллюстрирует существование пика в день после прохождения секторной границы в течение обоих периодов. Эти два пика не очень статистически значимы каждый в отдельности. Но мы увидим, что они могут быть значимы в совокупности.

Вероятность того, что эти пики случайны, может быть проверена двумя простыми тестами. Для заданных 7 значений из представленных на рис. 2 вероятность появления случайно выбранного пика в день после прохождения сектора равна $1/7$. Соответственно вероятность пика для двух независимых событий с тем же запаздыванием равна $1/49$ ($\sim 2\%$). Основываясь на этом простом непараметрическом тесте, приходим к заключению, что данная гипотеза имеет 2% -ный уровень значимости.

Более точная проверка требует нормального распределения значений индексов, так же как и независимости ряда данных средних значений. Оба эти условия хорошо удовлетворяются.

Среднее значение индекса частоты гроз для запаздывания

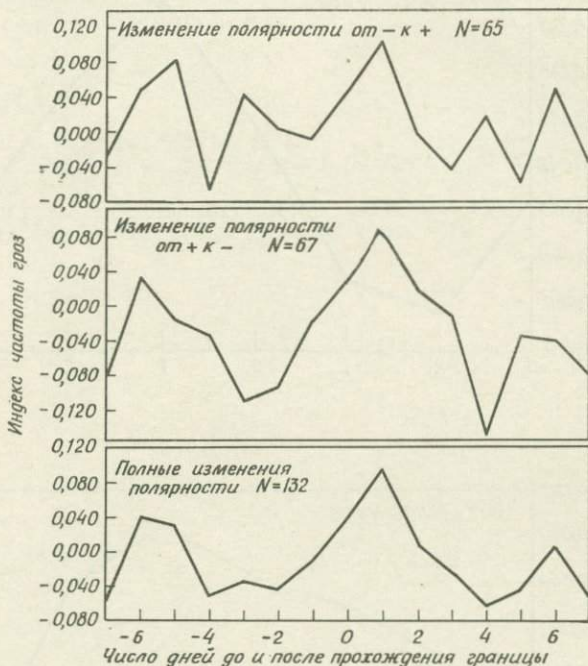


Рис. 1. Ключевой день — секторная граница — по данным за 1966—1976 г., за ноябрь—март для $40-45^\circ$ с. ш.

в один день было выше общего среднего на $0,86\sigma_m$ в течение 1947—1956 г. (σ_m — среднее квадратичное отклонение). Вероятность случайного превышения на $0,86\sigma_m$ равна 20,5%. Для 1957—1965 гг. соответствующее значение лежит выше общего среднего на $1,8\sigma_m$ с вероятностью превышения 3,6%. Так как эти два периода независимы, то суммарная вероятность того, что наблюдаемые пики для обоих периодов превысят их характерную величину, равна $0,205 \times 0,036 = 0,0074 = 0,74\%$. Таким образом, наблюдаемые пики в грозовой активности имеют уровень значимости более 1%.

Поскольку подобный результат, а именно существование максимума на +1 день, был найден в двух независимых выборках, то это, вероятно, характеризует взаимосвязь между

секторной структурой и частотой появления гроз в широтном интервале от 40 до 45° зимой в момент изменения полярности ММП от + к —.

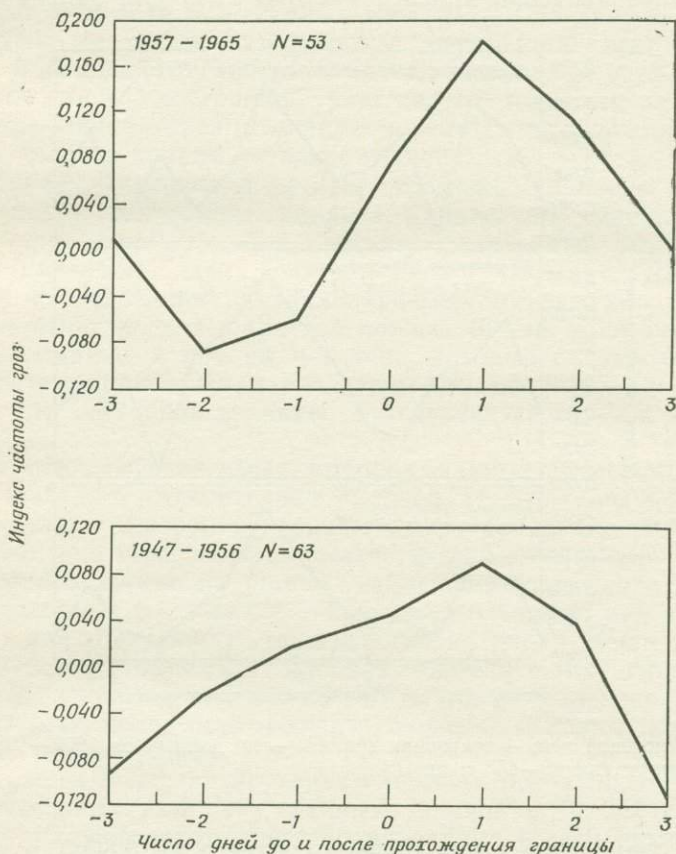


Рис. 2. Ключевой день — секторная граница — по данным за ноябрь—март для 39—45° с. ш.

Ограниченность области широт, в которой найдена эта связь, вероятно, обусловлена следующим: 1) летом и зимой углы между направлениями солнечного ветра и магнитного диполя Земли различны; 2) проникновение энергичных частиц в полярную область Земли изменяется в соответствии с секторной полярностью; 3) самый северный из проанализированных интервалов наиболее близок к высоким магнитным широтам, наиболее подверженным влиянию солнечных частиц.

Было бы желательно повторить подобный анализ данных по грозовой активности для более высоких чем 45° широт и всех долгот, особенно в южном полушарии. Следуя высказанной гипотезе, можно предположить, что частота гроз в южном полушарии должна быть относительно более высокой при изменении полярности от $-$ к $+$, чем от $+$ к $-$, как это имеет место в северном полушарии.

Литература

1. Markson R. Pageoph., 84, 161, 1971.
2. Wilcox J., Scherrer P. H., Svalgaard L., Roberts W. O., Olson R. H. 180, 185, 1973.
3. Svalgaard L. Interplanetary Sector Structure 1947—1975, SUIPR Rep. No. 648, Inst. for Plasma Res., Stanford Univ., 1976.

РОЛЬ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В СВЯЗИ ПОГОДЫ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

М. С. Мюир

Исследован механизм, с помощью которого электрическая проводимость атмосферы может влиять на развитие гроз в некоторых регионах. Изменения в числе гроз приводят к достаточно большим изменениям в энергии, которыми можно объяснить некоторые изменения в тропосферной циркуляции.

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известны корреляции между солнечной активностью и некоторыми параметрами погоды. В недавних попытках объяснить их было сделано допущение [1, 2] о том, что изменение характеристик атмосферного электричества под воздействием солнечной активности может лежать в основе механизма этих корреляций. Марксон [1] показал, что можно объяснить наблюдаемое увеличение электрического поля после протонных вспышек [3] и пересечений границ солнечно-магнитной структуры [4] без привлечения каких-либо изменений в самом генераторе грозы. Наблюдаемое изменение числа гроз, вызываемое солнечными вспышками [5], и возможное изменение числа гроз в течение солнечного цикла [6, 7] привели Марксона к двум возможным объяснениям рассматриваемого механизма [1]. Они включают прямой локальный эффект, связанный с увеличением ионизирующей радиации над большими кучевыми облаками, и косвенный планетарный эффект, обусловленный увеличением электрических полей вблизи развивающихся кучевых облаков.

2. ГРОЗЫ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АТМОСФЕРЫ

Здесь постулируется, что электрическая проводимость атмосферы может также составлять часть эффекта косвенного глобального воздействия солнечной активности на грозовую активность. Хорошо известно, что имеется обратная корреляция между ионизацией (и, следовательно, проводимостью)

и числом солнечных пятен. В связи с тем, что изменения ионизации в течение солнечного цикла зависят от геомагнитной широты [8], можно ожидать, что проводимость также будет меняться с широтой, увеличиваясь по мере приближения к полюсам.

Допустим далее, что вероятность развития грозы (т. е. образование в грозовой облачности пробойного электрического потенциала) зависит от преобладающего в данном месте электрического состояния атмосферы и увеличивается в условиях низкой проводимости. Таким образом, при постоянных солнечных и термодинамических условиях грозы должны развиваться предпочтительнее в низких чем в высоких широтах (рис. 1). На фиксированной широте развитие грозы должно усиливаться в периоды максимума солнечных пятен, когда проводимость минимальна. В меньшем временном масштабе вспышка или прохождение секторной границы,

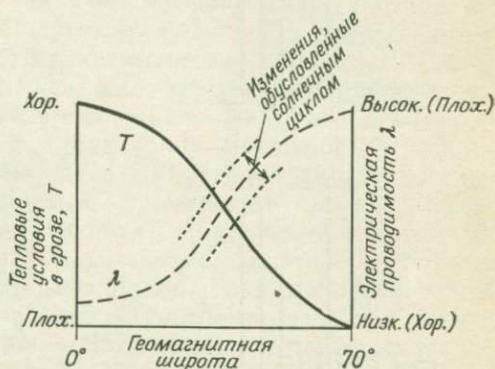


Рис. 1. Схематическое представление соотношения между термодинамическими и электрическими условиями, которые предположительно необходимы для развития грозы (Хор.— благоприятные условия, Плох.— неблагоприятные).

которые приводят к относительно кратковременному уменьшению интенсивности галактических космических лучей (такому, как форбуш-понижение в случае вспышки), вызовут уменьшение проводимости и усиление грозовой активности. Изменение проводимости под влиянием ионизирующей радиации солнечного происхождения в значительной степени ограничивается областью высот над вершинами грозовых облаков, а это существенно определяет силу тока между облаком и электросферой, как отмечал Марксон [1]. Следует ожидать, что конкретная солнечная вспышка окажет максимальное воздействие на проводимость в период максимальной солнечной активности, когда окружающая проводимость имеет минимальное значение. Этот эффект, выявляемый по данным работы [5], показан на рис. 2. Необходимо отметить, что указанные значения числа регистраций гроз за день могут быть завышены из-за изменения в течение солнечного цикла условий распространения радиоволн очень низких частот, которые, как показал Несторов [9], наиболее благоприятны в период максимальной солнечной активности.

В проведенном выше рассмотрении окружающие термодинамические условия были приняты постоянными. В некоторых географических регионах, однако, тепловые условия таковы, что грозы хорошо формируются независимо от окружающей проводимости. В других районах изменения проводимости таковы,

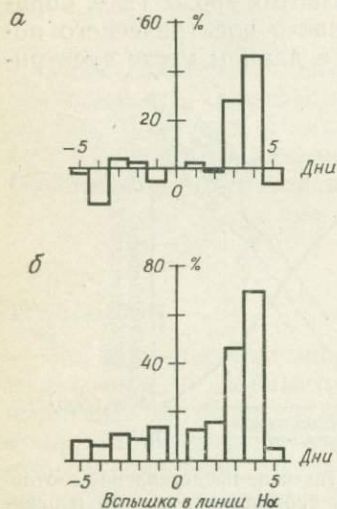


Рис. 2. Вариации в распределении числа регистраций гроз за день в сопоставлении с солнечными вспышками, проанализированные методом наложенных эпох [5]. а — 1961—1965 гг., среднее число солнечных пятен $\bar{R}_z = 28,9$; б — 1966—1970 гг., среднее число солнечных пятен $\bar{R}_z = 91,3$.

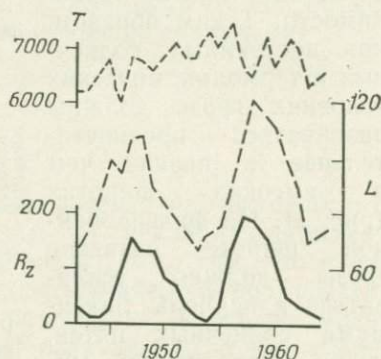


Рис. 3. Изменения в числе солнечных пятен (R_z , сплошная кривая) в сравнении с изменением числа гроз в Англии (индекс молний L , пунктирная кривая) и в Северной Америке (T , согласно [7], пунктирная кривая).

что даже самый высокий ее уровень достаточно мал для развития грозы. Однако, когда тепловые условия оказываются такими, что развитие грозы возможно лишь при достаточно низком уровне окружающей проводимости, влияние солнечного цикла будет проявляться в положительной корреляции между числом гроз и числом солнечных пятен. Благодаря этому можно объяснить наличие корреляции между указанными двумя параметрами в работе Стрингфеллоу [6] и отсутствие ее в работе Лесбриджа [7], как это видно из рис. 3. Описанная ситуация в соотношении тепловых и электрических условий образования гроз приведена на рис. 1. Следует отметить, что реальная картина на самом деле очень сложна, о чем наглядно свидетель-

ствуют рассмотренные конфигурации реального геомагнитного поля [10] и планетарное распределение грозовой активности [11].

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Уиллис [12] рассчитал, что энергия, связанная с изменением завихренности атмосферы над уровнем 300 мбар, составляет около 10^{17} Дж. Брэхэм [13] оценил, что энергия, передаваемая одной грозой атмосфере, составляет величину порядка 10^{15} Дж, а более низкое значение 10^{14} Дж было получено Коппани [14]. Согласно Чалмерсу [15], вероятно, около 3000 гроз действует в каждый данный момент в планетарном масштабе. Это приводит к поступлению от $3 \cdot 10^{17}$ до $3 \cdot 10^{18}$ Дж энергии в высокие слои атмосферы. Таким образом, изменением от 3 до 30 % числа действующих гроз в результате изменений солнечной активности можно объяснить изменение энергии в системе низкого давления в северном полушарии. Если же обеспечение энергией погодных процессов такого большого масштаба может получить удовлетворительное объяснение, то некоторые из явлений более мелкого масштаба можно объяснить еще легче. Например, корреляция между средним числом солнечных пятен и температурой поверхности моря, обнаруженная Мюиром [16], была объяснена Колебруком [17] с точки зрения прямого теплообмена с атмосферой и изменений в процессе атмосферной циркуляции в целом над Северной Атлантикой.

Механизм, предложенный здесь, в целом умозрительен, но такое рассмотрение обладает тем достоинством, что позволяет выделить области, которые полезно исследовать. В нашем случае к таким областям можно отнести роль фоновой проводимости в развитии гроз, влияние грозовой активности на атмосферную циркуляцию и фазовые соотношения между различными коррелирующими параметрами.

Литература

1. Markson R. Nature, 273, 103, 1978.
2. Muir M. S. S. Afr. J. Phys., in press, 1978.
3. Reiter R. Pure Appl. Geophys., 86, 142, 1971.
4. Reiter R. Naturwiss., 63, 192, 1976.
5. Bossolasco M., Dagnino I., Elena A., Flocchini G. Istituto Universitario Navale di Napoli, Meteorol. Oceanog., 1, 213, 1972.
6. Stringfellow M. F. Nature, 249, 332, 1974.
7. Lethbridge M. D. Quoted by R. Markson. Pure Appl. Geophys., 84, 161, 1971.
8. Hake R. D., Pierce E. T., Viezee W. Stratospheric Electricity p. 79, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, 1973.
9. Nestorov G. T. J. Atmos. Terrest. Phys., 39, 741, 1977.

10. *Cain J. C., Hendricks S. J.* NASA Technical Note, D-4527, 1968.
11. *Israel H.* Atmospheric electricity, vol. II, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Figure 340, 1973.
12. *Willis D. J.* Atmos. Terrest. Phys., **38**, 685, 1976.
13. *Braham R. R. J.* Meteorol., **9**, 227, 1952.
14. *Koppany G.* Meteorol. Mag., **104**, 302, 1975.
15. *Chalmers J. A.* Atmospheric electricity. 2nd ed., Pergamon Press, Oxford, p. 307, 1967. [Имеется перевод: Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество.— Л.: Гидрометеониздат, 1974.]
16. *Muir M. S.* Nature, **266**, 475, 1977.
17. *Colebrook J. M.* Nature, **266**, 476, 1977.

ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПОГОДУ, СВЯЗАННЫЕ С ПЛАНЕТАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Г. Волланд

В литературе недавно много писалось о некоторых эффектах воздействия солнечной активности на погоду, характеризующихся как длинными, так и короткими периодами. Рассматривалась роль солнечных пятен, секторной структуры межпланетного магнитного поля и солнечных вспышек. Здесь мы исследуем связь активных областей на Солнце и изменений погоды в тропосфере с участием сверхдлинных волн. В этом отношении наиболее вероятным связующим звеном является повышенное электромагнитное излучение от активных долгот на Солнце, проникающее по крайней мере вплоть до стратосферных высот. Это излучение может вызывать изменение ветра и профиля температуры в стратосфере. Сверхдлинноволновое геопотенциальное поле в тропосфере чувствительно к этим изменениям. Поэтому эффект, возникший первоначально в средней атмосфере, может быть замечен по распространению планетарной волны в тропосфере. Возросшее солнечное излучение при поглощении его стратосферой может также изменять альбедо и, следовательно, непосредственно генерировать тропосферные планетарные волны. Для различных масштабов времени, в частности для волн с периодом 27 сут, проведена оценка ожидаемого притока тепла, структуры и амплитуд волн.

1. ВВЕДЕНИЕ

В литературе недавно были рассмотрены несколько типов воздействий солнечной активности на погоду. Они характеризуются как малыми [14, 24], так и большими временными масштабами [6, 18] и имеют связь с солнечными пятнами, секторной структурой межпланетного магнитного поля и солнечными вспышками. В настоящее время не существует единого мнения о реальности этих эффектов, ввиду того что эти явно малые эффекты воспроизводятся с трудом. Более того, не достает звеньев в ряду правдоподобных механизмов, осуществляющих связь событий на Солнце, в межпланетной среде или

верхней атмосфере с явлениями в тропосфере. Из энергетических соображений крайне маловероятен любой процесс взаимодействия, сопровождающийся передачей энергии из верхней атмосферы в нижнюю [25]. Поэтому Герман и Гольдберг [12] и Марксон [17] выдвигают гипотезу, согласно которой солнечная активность может изменять электропроводность нижней и средней атмосферы и таким образом косвенно участвовать в процессах возбуждения гроз. Такой механизм должен иметь малые временные масштабы и поэтому мог бы объяснить эффекты, характеризующиеся короткими характерными периодами — порядка нескольких дней.

Рассмотрим другой механизм, который может объяснить возникновение длиннопериодных эффектов с характерными временами в месяц или более. Он связан с планетарными волнами. Известно, что ультрафиолетовое и крайнее ультрафиолетовое излучения Солнца изменяются в течение 11-летнего цикла солнечной активности. Кроме того, на Солнце имеются активные долготы, которые вращаются вместе с Солнцем, существуют длительное время и связаны с *M*-областями, ответственными за рекуррентные геомагнитные явления [19]. Малые вариации солнечной постоянной, связанные с активными долготами, не являются неправдоподобными. Действительно, Фукал и др. [8] указывают, что на поверхности Земли наблюдается 27-дневная вариация солнечной постоянной с амплитудой порядка 0,1%. Они приписывают это явление изменениям концентрации O_3 , вызванным вариациями ультрафиолетового излучения от солнечных факельных площадок. Об изменении содержания O_3 в течение цикла солнечной активности сообщал Петцольд [20], а модельные расчеты воздействия вариаций солнечного ультрафиолетового излучения на структуру и состав стратосферы показывают, что количество O_3 , содержащееся в единичном столбе атмосферы, может увеличиваться на 14% от минимума к максимуму солнечной активности, в то время как температура может возрастать на 12 К [3].

27-дневная периодичность солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, может порождать вынужденные планетарные волны и в тропосфере [22]. 11-летние циклические вариации структуры и состава стратосферы могут влиять на распространение сверхдлинных волн в тропосфере [1, 9].

В этой статье мы оценим приток тепла вследствие малых 27-дневных вариаций солнечной постоянной и соответствующую этому реакцию атмосферы. Затем мы исследуем влияние структуры стратосферы на распространение планетарных волн.

2. ПОСТУПЛЕНИЕ ТЕПЛА ПРИ 27-ДНЕВНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ПОСТОЯННОЙ

Атмосфера и поверхность Земли поглощают солнечное коротковолновое излучение и переизлучают его в инфракрасной области. При изменениях этого излучения с периодом порядка месяца охлаждение за счет переизлучения длинными зональными волнами не меняется [7]. Солнечное тепло, запасенное Землей, переносится в нижние слои атмосферы за счет турбулентности всех масштабов. Можно параметризовать этот турбулентный перенос путем введения коэффициента турбулентного переноса $v \sim 15$ м/с [15]. Диффузионное уравнение, описывающее турбулентный перенос, имеет вид [11]

$$\frac{\partial n}{\partial t} - v \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} = \Delta Q_R \exp(-i\omega t), \quad (1)$$

где n — энтальпия, t — время, z — высота, ΔQ_R — непосредственный нагрев коротковолновым излучением и $\omega = 2\pi/27$ сут = $2,7 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹ — частота вынуждающего воздействия. Решение уравнения (1) имеет вид

$$n(z, t) = \left\{ \Delta Q_R + (\Delta Q_{R_0} - \Delta Q_R) \exp \left[-\frac{(1-i)z}{\tilde{H}} \right] \right\} \frac{\exp(-i\omega t)}{(-i\omega)}, \quad (2)$$

где ΔQ_{R_0} — граничное значение на поверхности земли и $\tilde{H} = (2v/\omega)^{1/2} \approx 3,5$ км — (положительная) шкала высот. Уравнение (2) описывает два различных процесса. Первый из них имеет амплитуду ΔQ_R , постоянную в вертикальном направлении. Второй представляет собой бегущую вверх тепловую волну, вызванную вертикальной диффузией в направлении от Земли; амплитуда этой волны быстро убывает по экспоненте.

Если параметризовать изменяющееся граничное значение нагрева ΔQ_{R_0} аналогично тому, как это сделано для среднего значения на границе, то получается $\Delta Q_{R_0} \approx 10^{-4}$ Вт/кг и $\Delta Q_R \approx 10^{-5}$ Вт/кг при условии, что амплитуда вынуждающего воздействия соответствует относительному изменению солнечной постоянной, равному 10^{-3} [11]. Ясно, что в тропосфере процесс вертикального диффузионного переноса тепла преобладает по сравнению с нагревом коротковолновым солнечным излучением. Следовательно, величиной ΔQ_R можно пренебречь.

Амплитуда величины притока тепла в уравнении (2) представляет собой значение, осредненное по всему земному шару. Ее географическое распределение определяется зенитным углом Солнца и тепловым контрастом между сушей и океаном. Оба фактора обуславливают образование системы стоячих волн,

зависящей от широты φ , долготы λ и склонения Солнца δ . Эта система может быть представлена в виде ряда Фурье функции $f(\varphi, \lambda, \delta)$ по λ . Коэффициенты ряда зависят от φ и δ . Керц [13] вычислил эти коэффициенты в предположении, что изменение температуры на поверхности океана равно нулю. Таким образом, в качестве движущей силы, порождающей планетарные волны, мы имеем следующую функцию вынуждающего воздействия:

$$Q = f \frac{\partial n}{\partial t} = \Delta Q_{R_0} \exp \left\{ \frac{(1-\varepsilon)z}{2H} - i\omega t \right\} \times \sum_{m=0}^{\infty} \{ a^m(\varphi, \delta) \cos m\lambda + b^m(\varphi, \delta) \sin m\lambda \}. \quad (3)$$

Здесь мы ввели величину

$$\varepsilon = \varepsilon_r - i\varepsilon_i \operatorname{sign}(\omega), \quad (4)$$

где $\varepsilon_i = 2H/\bar{H} \approx 4$, $\varepsilon_r = 1 + \varepsilon_i \approx 5$, $H = 7,5$ км — средняя шкала высот для давления; \bar{H} взято из уравнения (2).

Используем данную вынуждающую силу в линейной теории приливов. Для этого требуется задать преобладающий зональный ветер. В простейшем приближении возьмем опережающее вращение атмосферы:

$$U = U_0 \cos \varphi \quad (5)$$

с величиной $U_0 \approx 10 \div 20$ м/с в тропосфере и $U_0 \gg 20$ м/с в стратосфере. При этом предполагается, что восточными ветрами на экваторе можно пренебречь. Однако структура волн, которые мы рассматриваем, соответствует волнам типа Россби—Гаурвица с резко увеличенными амплитудами в высоких широтах и большими вертикальными и горизонтальными масштабами. Поэтому можно ожидать, что введение реальной конфигурации ветра не внесет существенных изменений в наши результаты.

3. ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН

Линейная теория приливов предсказывает существование планетарных волн, вызванных внешним источником нагрева, со следующими амплитудами давления и скорости вертикального ветра [23]:

$$\left. \begin{matrix} p \\ w \end{matrix} \right\} = \sum \left\{ \begin{matrix} p_n^m(z, \omega_D) \\ w_n^m(z, \omega_D) \end{matrix} \right\} \Theta_n^m(\varphi, \omega_D) \exp \{ i(m\lambda - \omega t) \}, \quad (6)$$

где $\Theta_n^m(\varphi, \omega_D)$ — функции Хафа, зависящие от широты и частоты, испытавшей доплеровский сдвиг:

$$\omega_D = \omega - mU/a; \tag{7}$$

здесь a — радиус Земли, U_0 берется из уравнения (5), ω — частота вынуждающей силы, а m и n — зональные и меридиональные волновые числа. При условии $m \geq 0$ волны распространяются на восток (запад), если частота ω положительна (отрицательна).

Функции Хафа можно определить из приливного уравнения Лапласа [16]. Функции высотной структуры p_n^m и w_n^m определяются из взаимно связанных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{p}_n^m}{dz} &= -\frac{i\bar{w}_n^m}{Hh_n^m} + \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{h_n^m}\right)\bar{p}_n^m, \\ \frac{d\bar{w}_n^m}{dz} &= \frac{\bar{w}_n^m}{h_n^m} - i\left(\frac{H}{h_n^m} - \frac{1}{\gamma}\right)\bar{p}_n^m + (\gamma - 1)\frac{Q_n^m}{gH\gamma\omega_D}, \end{aligned} \tag{8}$$

где

$$\bar{w}_n^m = \frac{w_n^m}{\omega_D}, \quad \bar{p}_n^m = \frac{1}{p_0} \left\{ p_n^m + i\bar{w}_n^m \frac{dp_0}{dz} \right\},$$

γ — постоянная адиабаты, g — ускорение силы тяжести и p_0 — давление в основном состоянии. Q_n^m — коэффициент ряда для величины притока тепла [см. уравнение (3)], разложенной по функциям Хафа. Очевидно, что система стоячих волн величины Q из уравнения (3) порождает волны, распространяющиеся на восток и на запад. Поскольку эта система зависит от распределения суши и океанов, существенную ее часть составляют волны с волновым числом $m = 2$.

Эквивалентные высоты h_n^m , являющиеся собственными значениями решения уравнения Лапласа, представлены на рис. 1 как функции нормированной частоты ω/Ω для случая, когда волновое число $m = 2$ ($\Omega = 2\pi/1$ сут $= 7,29 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹ — частота вращения Земли). Собственные значения h_n^m соответствуют двум типам волн: I — гравитационные и II — волны вращения. Волны II типа с положительными h_n^m и отрицательными частотами представляют собой внутренние волны типа волн Россби—Гаурвица. Их амплитуды достигают максимума на средних и высоких широтах. На рис. 2 показана меридиональная структура волн Россби—Гаурвица с $m = 2$ [т. е. нормали-

зованных функций Хафа из уравнения (6)] — их зависимость от широты. Структура этих волн очень похожа на структуру внутренних волн II типа. На рис. 1 волны II типа с отрицательными h_n^m являются внешними, или затухающими, вол-

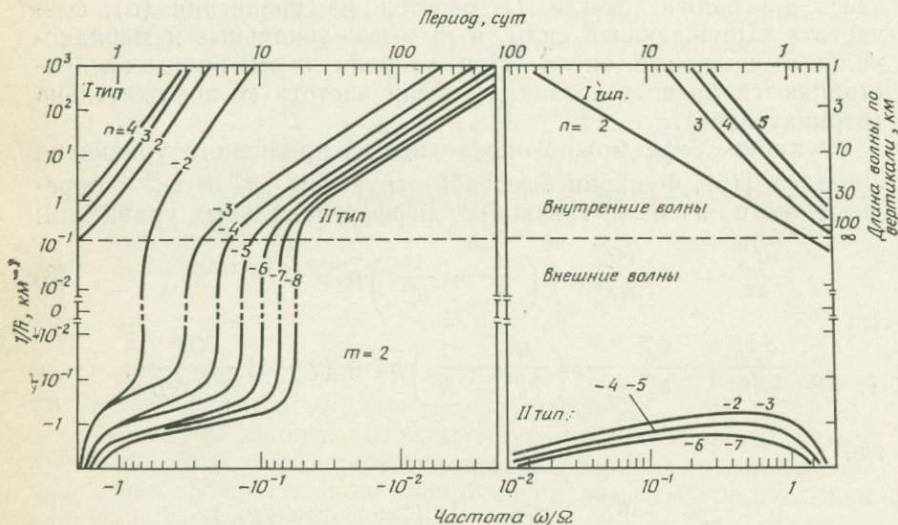


Рис. 1. Обратные величины эквивалентных высот в зависимости от нормированной частоты для планетарных волн с зональным волновым числом $m=2$. Справа дан масштаб длин волн по вертикали. Волны с положительными n : волны I типа, или гравитационные волны; с отрицательными n : волны II типа, или волны вращения. Горизонтальная пунктирная прямая разделяет внутренние волны с конечной длиной волны по вертикали и внешние волны с бесконечно большой длиной волны. Логарифмический масштаб по оси ординат соответствует как положительным, так и отрицательным значениям $1/h$.

нами, которые не могут переносить энергию в вертикальном направлении. Внутренние волны I типа с периодами более чем приблизительно 10 сут, концентрируются в экваториальных областях. Кроме того, у них длины волн по вертикали менее 1 км, и потому эти волны подвержены разрушающим их взаимодействиям. Таким образом, за пределами тропической зоны преимущественно распространяются волны II типа с отрицательной частотой, испытавшей доплеровский сдвиг.

В случае стоячих ($\omega=0$) волн с $m=2$ частота с учетом доплеровского сдвига отрицательна, если преобладающий ветер направлен на запад и имеет скорость $U_0 < 70$ м/с. Это условие совместимо с теоремой Черни и Дрезина о том, что вне тропической зоны вертикальное распространение сверхдлинных

волн может происходить только в присутствии западных ветров со скоростью, меньшей некоторого критического значения [2].

Функции высотной структуры для этих волн можно вычислить исходя из уравнения (8) стандартными методами. В случае орографического вынуждающего воздействия граничное условие на поверхности Земли имеет вид

$$\omega_n^m(0) = imU_0L_n^m/a, \tag{9}$$

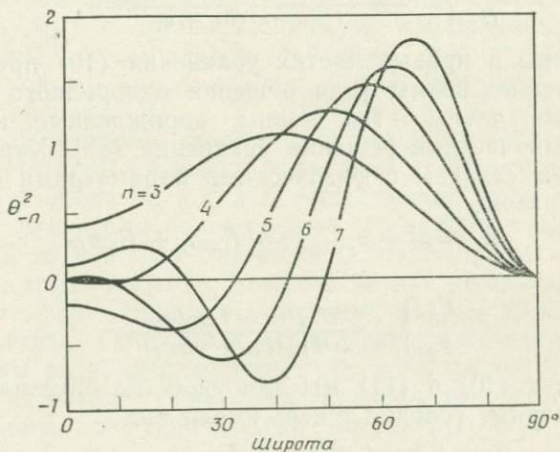


Рис. 2. Зависимость от широты нормированных функций Хафа волн Россби—Гаурвица с зональным волновым числом $m=2$. Волны с нечетными значениями $m-n$ симметричны относительно экватора, волны с четными значениями антисимметричны.

где L_n^m — компонента с волновыми числами m и n орографической высоты над уровнем моря; в случае теплового вынуждающего воздействия $\omega_n^m(0) = 0$. Верхним граничным условием является условие излучения Зоммерфельда при z_n . Оно состоит в том, что выше z_n волна распространяется вверх без отражения.

4. ПРОСТЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Если представить атмосферу в виде изотермических слоев с постоянным преобладающим ветром в каждом слое, то уравнение (8) будет иметь внутри каждого i -го слоя аналитическое

решение в виде характеристических волн, распространяющихся вверх (a_i) и вниз (b_i):

$$a_i = a_{i0} \exp \left\{ \frac{(1 - ia_i)(z - z_i)}{2H_i} \right\} + Q_0 G_{ai} \exp \left\{ \frac{(1 - \varepsilon)z}{2H_i} \right\},$$

$$b_i = b_{i0} \exp \left\{ \frac{(1 + ia_i)(z - z_i)}{2H_i} \right\} + Q_0 G_{bi} \exp \left\{ \frac{(1 - \varepsilon)z}{2H_i} \right\}, \quad (10)$$

$$a_i = \left\{ \frac{4(\gamma - 1)H_i}{\gamma h_i} - 1 \right\}^{1/2} \text{sign}(\omega),$$

$$\left. \begin{matrix} G_{ai} \\ G_{bi} \end{matrix} \right\} = \frac{(\gamma - 1)(1 \pm ia_i - 2H_i/h_i)}{i\gamma g \alpha_i \omega_{Di}(ia_i \mp \varepsilon)}.$$

Первые члены в правых частях уравнения (10) представляют собой свободные волны [или решения однородного уравнения (8)], вторые члены — это волны, порожденные источником тепла Q [или частные решения уравнения (8)]. Характеристические волны связаны с физическими параметрами волн следующим образом:

$$\bar{\omega}_i = a_i + b_i, \quad \bar{p}_i = F_{ai}a_i + F_{bi}b_i, \quad (11)$$

где

$$\left. \begin{matrix} F_{ai} \\ F_{bi} \end{matrix} \right\} = \frac{2H_i/h_i - 1 \pm ia_i}{2iH_i(H_i/h_i - 1/\gamma)}.$$

В уравнениях (10) и (11) мы для удобства опустили индексы m и n . Граничные условия теперь имеют вид

$$a_{10} + b_{10} + \bar{W}_1 Q_0 = L, \quad b_{n0} = 0, \quad (12)$$

где для краткости принято

$$\bar{W}_1 = G_{a1} + G_{b1}, \quad \bar{P}_1 = F_{a1}G_{a1} + F_{b1}G_{b1}.$$

В каждом слое существуют волны, распространяющиеся как вверх, так и вниз вследствие частичного отражения от разделяющих поверхностей. Решение становится особенно простым в случае единственного слоя (изотермическая атмосфера). Тогда

$$a_{10} = L - \bar{W}_1 Q_0, \quad b_{10} = 0, \quad (13)$$

$$\bar{\omega} = Q_0 \bar{W}_1 \left(\exp \left\{ \frac{(1 - \varepsilon)z}{2H} \right\} - \exp \left\{ \frac{(1 - ia)z}{2H} \right\} \right) +$$

$$+ L \exp \left\{ \frac{(1 - ia)z}{2H} \right\},$$

$$\bar{p} = Q_0 \left(\bar{P}_1 \exp \left\{ \frac{(1 - \varepsilon)z}{2H} \right\} - F_a \bar{W}_1 \exp \left\{ \frac{(1 - ia)z}{2H} \right\} \right) +$$

$$+ F_a L \exp \left\{ \frac{(1 - ia)z}{2H} \right\}. \quad (14)$$

Эти решения показывают, что волны, порожденные тепловым воздействием, состоят из двух компонент: одна компонента образуется непосредственно за счет источника тепла и экспоненциально спадает с высотой при $Re(\epsilon) > 1$; вторая компонента обусловлена тепловой волной, отражающейся от поверхности земли и распространяющейся после этого как свободная волна. В случае внутренних волн (α действительно) вторая компонента растет экспоненциально в направлении вверх до тех пор, пока не достигнет высот, на которых начинается ее диссипация. Обе компоненты волны имеют в пределах нижней тропосферы сравнимые амплитуды и, следовательно, могут интерферировать друг с другом. Минимум, наблюдавшийся вблизи высоты 3 км для амплитуды давления стоячих планетарных волн с волновыми числами 1 или 2 [5], мог быть обусловлен такой интерференцией.

С другой стороны, волны, порожденные орографическим воздействием [третьи члены в уравнении (14)], экспоненциально возрастают с высотой, когда α вещественно. Если представить атмосферу двумя или более слоями, то идущие вверх волны a_i отражаются на поверхностях раздела, создавая распространяющиеся вниз компоненты b_i . Взаимодействие между a_i и b_i в пределах тропосферы вносит в уравнение (14) модуляцию высотной структуры. Поскольку у внутренних планетарных волн длина волны по вертикали имеет тот же порядок, что и шкала высот по давлению, или даже превосходит ее (см. рис. 1), а метод слоев дает приемлемые результаты в случае, когда толщина слоя меньше четверти длины волны, тропосферу можно представить небольшим количеством слоев.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Чтобы определить порядок величины амплитуды, достаточно представить атмосферу в виде одного или двух изотермических слоев. При изучении действия изменений на 0,1% притока солнечного тепла с периодом 27 сут мы использовали модель изотермической атмосферы со шкалой высот $H = 7,5$ км. Профиль притока тепла был получен решением уравнений (3) и (4) при $\Delta Q_{R_0} = Q_0 = 10^{-4}$ Вт/кг и $\bar{H} = 3,5$ км. Мы рассмотрели волны с волновым числом $m = 2$. При скоростях преобладающего ветра $9 < U_0 < 80$ м/с доплеровские частоты этих волн отрицательны ($\omega_D < 0$) и принадлежат к диапазону внутренних волн II типа на рис. 1. В качестве типичного примера мы выбрали волну (2, -4).

На рис. 3 показана зависимость от высоты функции высотной структуры амплитуды давления, выраженной в геопотенциальных метрах (гпм) ($\Delta h \approx -H \Delta p/p_0 = -H p_{-4}^2/p_0$). Кривые

1 и 2 соответствуют волнам, распространяющимся в восточном направлении ($\omega/\Omega = 1/27$). Величина скорости преобладающего ветра $U_0 = 10$ м/с для кривой 1 и 15 м/с для кривой 2. Кривая 3 относится к волне, распространяющейся на запад ($\omega/\Omega = -1/27$) при $U_0 = 10$ м/с. Длины волн в вертикальном направлении [$\lambda_z = 4\pi H/\text{Re}(\alpha)$] для соответствующих свободных

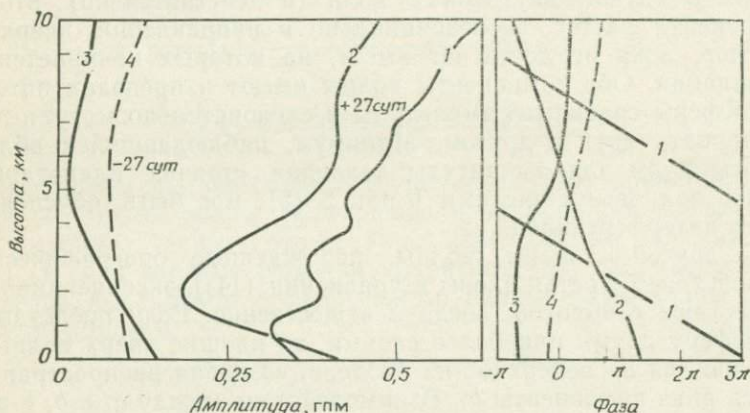


Рис. 3. Тепловое возбуждение волны (2,—4) с периодом 27 сут. Амплитуда (в гпм) и фаза (в радианах) функции высотной структуры p_{-4}^2 в зависимости от высоты для изотермической атмосферы со шкалой высот $H=7,5$ км и скоростью преобладающего зонального ветра 10 м/с (кривые 1, 3, 4) и 15 м/с (кривая 2). Приток тепла на поверхности земли $Q_0=10^{-4}$ Вт/кг и шкала высот для притока тепла $\tilde{H}=3,5$ км (кривые 1, 2, 3). Для кривой 4 $Q_0=3,2 \cdot 10^{-5}$ Вт/кг и $\tilde{H}=\infty$.

волн составляют 2,3 км для кривой 1, 10,5 км для кривой 2 и 32 км для кривой 3.

Заметим, что с увеличением длин волн в вертикальном направлении их амплитуды уменьшаются, а интерференционный минимум сдвигается на большие высоты. Таким образом, преобладающими являются волны, распространяющиеся в восточном направлении. Они имеют амплитуды порядка 0,5 гпм.

Чтобы продемонстрировать влияние вида высотного профиля притока тепла, при построении кривой 4 на рис. 3 использовались те же данные, что и для кривой 3, только высотный профиль притока тепла на единицу массы считался постоянным по высоте ($\tilde{H} \approx \infty$) при сохранении общего притока тепла в единичном столбе атмосферы [$\bar{Q}_0 = Q_0 \tilde{H} / (H + \tilde{H}) = 3,2 \cdot 10^{-5}$ Вт/кг]. Видно, что, как и ожидалось, амплитуды становятся больше на больших высотах.

С целью оценить влияние стратосферы на распространение сверхдлинных волн в тропосфере мы использовали двухслой-

ную модель — изотермическая тропосфера со шкалой высот $H_1 = 7,5$ км и преобладающим ветром $U_{10} = 10$ м/с и изотермическая стратосфера с параметрами H_2 и U_{20} . Тропопауза расположена на высоте z_{tr} . Сначала рассмотрим возбуждение за счет теплового вынуждающего воздействия волны (2, —4) с нулевой частотой (т. е с бесконечным периодом), используя величину $Q_0 = 10^{-2}$ Вт/кг [4] и профили тепла, даваемые урав-

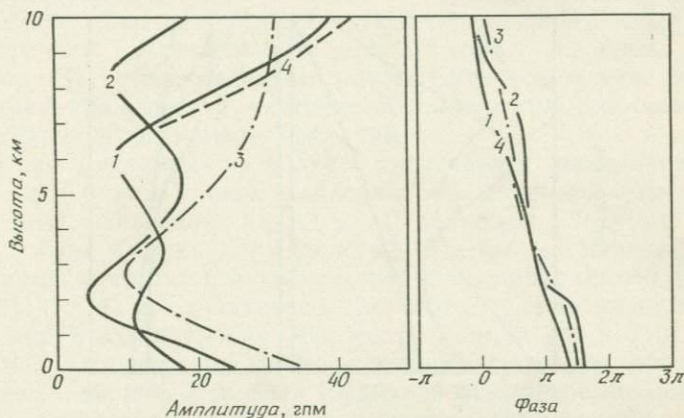


Рис. 4. Волна (2, —4) с частотой 0 (бесконечно большой период), возникшая за счет теплового вынуждающего воздействия. Амплитуда (в геопотенциальных метрах) и фаза (в радианах) функции высотной структуры в зависимости от высоты для двухслойной модели атмосферы. Приток тепла на уровне Земли $Q = 10^{-2}$ Вт/кг. Использовались следующие параметры (z_{tr} , км — высота тропопаузы; H_1 и H_2 , км — шкалы высот тропосферы и стратосферы; λ_1 и λ_2 , км — длины волн по вертикали в тропосфере и стратосфере):

Кривая	z_{tr}	H_1	H_2	U_{10}	U_{20}	λ_1	λ_2
1	10	7,5	6,5	10	20	16,5	32,5
2	12	7,5	6,5	10	20	16,5	32,5
3	10	7,5	7,5	10	30	16,5	16,5
4	10	7,5	6,5	10	30	16,5	54,8

нениями (3) и (4). Параметры, использованные в модельных расчетах, приведены в подписи к рис. 4. Кривые 1 и 4, отличающиеся скоростью преобладающих ветров в двух слоях, очень близки, поскольку коэффициент отражения на высоте z_{tr} изменился всего лишь от 0,6 до 0,7 для амплитуды и на 10° для фазы. Однако изменение высоты тропопаузы с 10 до 12 км (кривая 2) приводит к значительным изменениям, поскольку интерференционная картина коренным образом изменилась.

С целью сравнения на рис. 4 приведена кривая 3, рассчитанная для изотермической атмосферы; порядок величин тот же самый.

Возбуждение волны (2, —4) за счет орографического вынуждающего воздействия иллюстрирует рис. 5. Здесь при построении кривых 1 и 2 также использовалась двухслойная модель с теми же параметрами, что и у соответствующих кривых на рис. 4. У кривых 1 и 2, отличающихся высотой тропопauses, видны значительные различия, возникшие вследствие изменения картины интерференции между свободными вол-

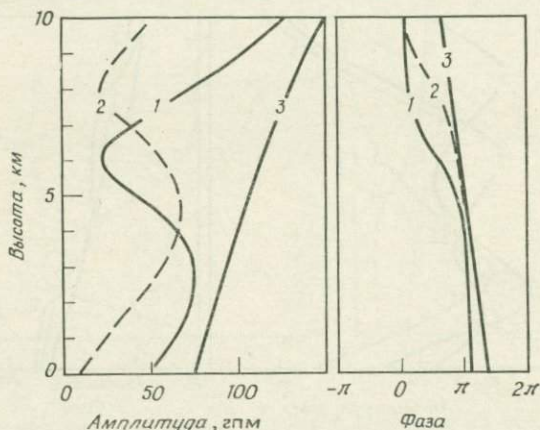


Рис. 5. Орографическое возбуждение волны (2, —4). Амплитуда (в геопотенциальных метрах) и фаза (в радианах) функции высотной структуры в зависимости от высоты для двухслойной модели при высоте тропопauses 10 км (кривая 1) и 12 км (кривая 2) и для изотермической атмосферы (кривая 3). Амплитуда орографического воздействия $L_{-4}^2 = 500$ м [4]. Параметры моделей атмосферы соответствуют параметрам кривых 1, 2, 3, приведенным в подписи к рис. 4.

нами, распространяющимися вверх и вниз. У кривой 3, рассчитанной для случая изотермической атмосферы с $H = 7,5$ км и $U_0 = 10$ м/с, амплитуды оказываются большими, чем у кривых 1 и 2. Это указывает на то, что отражение на тропопause приводит к разрушающей волне интерференции. Амплитуды порядка 100 ггм приблизительно в 3 раза больше, чем при возбуждении волн за счет теплового воздействия.

6. АНАЛИЗ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, представленные на рисунках, в основном согласуются с более сложными расчетами Бейтса [1] и Шатса [21]. (Однако Шатс использовал величину притока тепла на поверхности Земли 0,1 Вт/кг, поэтому амплитуда волн, возбужденных тепловым воздействием, у него в 10 раз больше величин на

рис. 4.) Полученные результаты показывают, что важным процессом в создании волновой картины является отражение от тропопаузы распространяющихся вверх сверхдлинных волн, возникших за счет теплового или орографического возбуждения. Отражение приводит к возникновению внутри тропосферы интерференционной картины, которая чувствительна главным образом к изменению высоты тропопаузы. Поскольку известно, что сверхдлинные волны с наименьшими волновыми числами в условиях зимы в средних широтах северного полушария осуществляют значительную долю полного переноса тепла к полюсу [1], этот механизм может быть ответственным за вековые изменения климата, частично обусловленные длиннопериодными солнечно-погодными эффектами.

Тот же механизм позволяет предсказать изменения примерно на 0,5 гпм уровня давления 500 мбар при изменениях солнечного излучения на 0,1 % с периодом 27 сут в связи с вращением Солнца. Это по крайней мере на порядок величины меньше соответствующего значения, приводимого Кингом и др. [14], и, следовательно, не может объяснить эффект изменения высоты уровня 500 мбар. Взамен Грин [10] предположил, что картина интерференции суточных приливных волн, возникающих в нижней и средней атмосфере, может изменяться внутри тропосферы в том случае, если солнечная активность вызывает изменения параметров стратосферы, характеризующиеся небольшими масштабами времени.

Выполненный недавно Шефером [26] спектральный анализ изменений высоты уровня 500 мбар показывает, что в тропосфере, вероятно, осуществляется отбор спектральных полос так, что помимо других постоянно существующих волн могут иметься волны с квазипериодами от 25 до 30 сут и временами жизни, измеряющимися месяцами или годами. Эти незатухающие волны, очевидно, возникают случайным образом за счет внутренних турбулентных процессов, не зависящих от каких-либо спусковых механизмов за пределами атмосферы. Амплитуды таких волн сравнимы с найденными Кингом и др. [14]. Если эта интерпретация верна, то «эффекты воздействия солнечной активности на погоду», характеризующиеся 27-дневной периодичностью, являются просто совпадением свойств двух совершенно независимых, постоянно существующих процессов: на Солнце (активные долготы с большим временем существования, вращающиеся вместе с Солнцем) и в атмосфере Земли (существование предпочтительного спектрального интервала вблизи периода 27 сут).

Литература

1. *Bates J. R.* Quart. J. R. Met. Soc., **103**, 397, 1977.
2. *Charney J. G., Drazin L. P.* J. Geophys. Res., **66**, 83, 1961.
3. *Gallis L. B.* Solar Terrestrial Coupling Conference, Yosemite, CA 1978.
4. *Derome J., Wiin-Nielsen A.* Mon. Weath. Rev., **99**, 564, 1971.
5. *Dickinson R. E.* CIAP Survey Conference Proceedings, 148, U. S. Dept. of Transportation, 1972.
6. *Eddy J. A.* Science, **192**, 1189, 1976.
7. *Falconer P. D., Peyinghaus W.* Arch. Meteor. Geophys. Bioklim., **B23**, 201, 1975.
8. *Foukal P. V., Mack P. E., Vernazza J. E.* Astrophys. J., **215**, 952, 1977.
9. *Geller M. A., Avery S. K.* Joint Symposium C, IAGA/IAMAP Assembly, Seattle, WA, 1977.
10. *Green J. S. A.* STP-Symposium, Innsbruck, 1978.
11. *Hantel M.* Private Communication, 1978.
12. *Herman J. R., Goldberg R. A. J.* Atm. Terr. Phys., **40**, 121, 1978.
13. *Kertz W.* Nachr. Akad. Wissench., Göttingen, Math-Phys. Kl, **6**, 145, 1956.
14. *King J. W., Slater A. S., Stevens A. D., Smith P. A., Willis D. M. J.* Atm. Terr. Phys., **39**, 1357, 1977.
15. *Lettau H., Landoldt-Bornstein, II.* Band, pp. 666, Eds. J. Bartels and P. ten Bruggencate, Springer Verlag, Berlin, 1952.
16. *Longuet-Higgins M. S.* Phil. Trans. Roy. Soc., London, **262**, 511, 1968.
17. *Markson R.* Nature, **273**, 103, 1978.
18. *Mitchell J., Stockton C. W., Meko D. M.* Joint Symposium C, IAGA/IAMAP Assembly, Seattle, WA, 1977.
19. *Neupert W. M., Pizzo V. J.* Geophys. Res., **79**, 3701, 1974.
20. *Paetzold H. K.* Pure and Appl. Geophys., **106**, 1308, 1973.
21. *Shutts G. J.* Quart. J. R. Met. Soc., **104**, 331, 1978.
22. *Volland H.* Nature, **269**, 400, 1977.
23. *Volland H., Mayr H. G.* Rev. Geophys. Space Phys., **15**, 237, 1977.
24. *Wilcox J. M. J.* Atm. Terr. Phys., **37**, 237, 1975.
25. *Willis D. M. J.* Atm. Terr. Phys., **38**, 685, 1976.
26. *Schaefer J.* This volume, 1979 (с. 309 настоящей книги).

ПЛАНЕТАРНЫЕ ВОЛНЫ НА УРОВНЕ 500 МБАР В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ И ИХ СВЯЗЬ С ВРАЩЕНИЕМ СОЛНЦА

Дж. Шефер

Используются несколько методов статистического частотного анализа и метод наложенных эпох для исследования связи между вращением Солнца и колебаниями высоты уровня 500 мбар.

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований последних лет указывают на то, что вращение Солнца должно влиять на некоторые тропосферные параметры [1, 2]. Согласно Кингу и др. [2], в северном полушарии колебания суточных значений числа солнечных пятен с периодом 27,5 сут сопровождаются колебаниями высоты поверхности 500 мбар. Зональная структура, по-видимому, обусловлена суперпозицией планетарных волн с низшими значениями волновых чисел. В настоящей работе мы проверим достоверность этой солнечно-земной связи с помощью методов наложенных эпох и статистического частотного анализа, применяемых к временным вариациям высоты поверхности 500 мбар, относительного числа солнечных пятен и направления межпланетного магнитного поля (ММП). Для анализа использовались ежедневные данные Службы погоды ФРГ за период времени с 1949 по 1975 г., касающиеся высоты уровней давления в точках сетки с шагом 5° по широте (от 15° до 90° с. ш.) и 10° по долготе. Данные по ММП взяты, начиная с 1926 г. [3].

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Чтобы получить представление о 27-дневных вариациях числа солнечных пятен и ММП, обратимся к рис. 1, на котором показаны графики суточных отклонений от скользящего среднего за 27 сут для числа солнечных пятен и направления ММП. Каждый ряд содержит по 4 солнечных оборота (108 сут) и смещен на 27 сут относительно предыдущего. При повторении

J. Schäfer. Astronomical Institute, University of Bonn, D5300 Bonn, W. Germany.

одного и того же дня в четырех реализациях наблюдаются области возрастания величины отклонений, которые характеризуют 27-дневную периодичность. Эти области образуют «волны», которые остаются неизменными в течение определенного промежутка времени, затем амплитуда их уменьшается, и после области с более или менее нарушенной периодичностью они возрождаются с новой фазой и другой частотой. На протяжении всего периода 1957—1975 гг. между числом солнечных пятен и направлением ММП когерентность не проявляется (как было проверено с помощью спектра когерентности), и поэтому высота уровня 500 мбар на рассматриваемой частоте не может коррелировать с обеими этими величинами. Как и следовало ожидать, в энергетических спектрах числа солнечных пятен и ММП, показанных на рис. 2, наблюдаются большие амплитуды вблизи частоты вращения Солнца f_0 . Дополнительно в спектре ММП имеется достаточно высокий

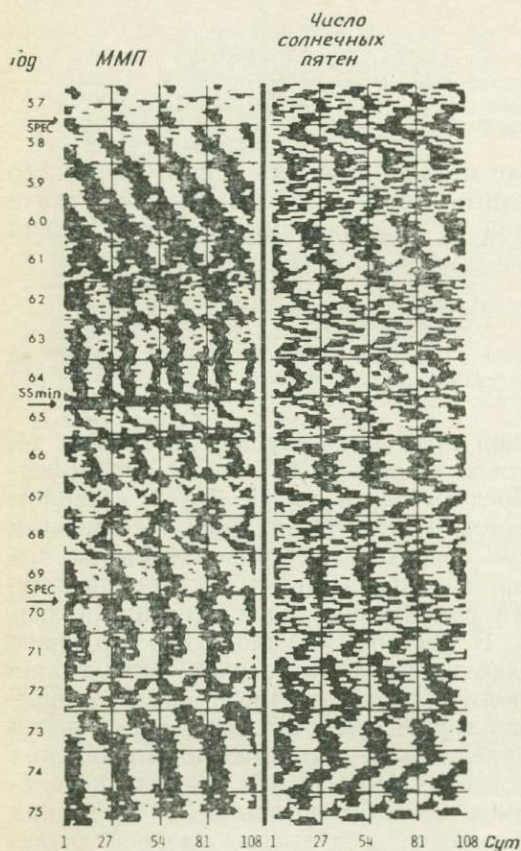


Рис. 1. Суточные отклонения от среднего значения числа солнечных пятен и от среднего направления ММП. Черные области соответствуют дням с числом пятен, превышающим скользящее среднее за 27 сут, и дням с направлением ММП от Солнца (см. текст). $SPFC$ — изменение полярности магнитного поля Солнца, SS_{min} — минимум солнечных пятен.

пик, соответствующий 14 сут, который указывает на то, что иногда проявляется четырехсекторная структура ММП.

Результаты аналогичного анализа данных о высоте поверхности 500 мбар в отдельных точках регулярной сети не дают значительных амплитуд вблизи этих значений периодов. Были

проведены спектральные оценки для ряда наблюдений за 9861 день с использованием окна Парцена длиной 500 сут и шириной полосы пропускания $0,001 \text{ сут}^{-1}$. При этом спектральное разрешение составляло $0,0037 \text{ сут}^{-1}$, а 95 %-ный довери-

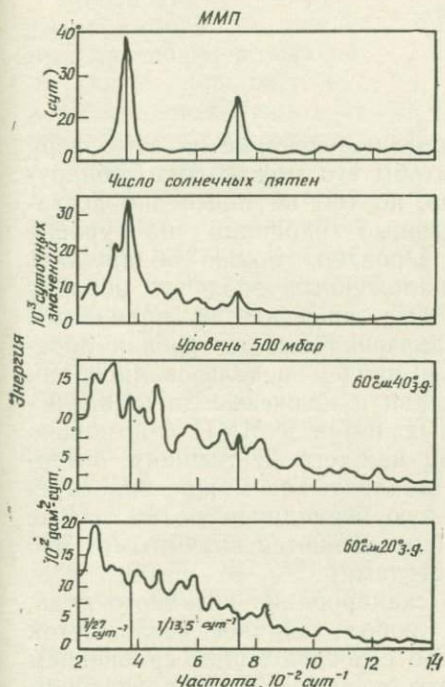


Рис. 2. Энергетические спектры ММП, числа солнечных пятен и высоты уровня 500 мбар для двух точек сети в период 1949—1975 гг.

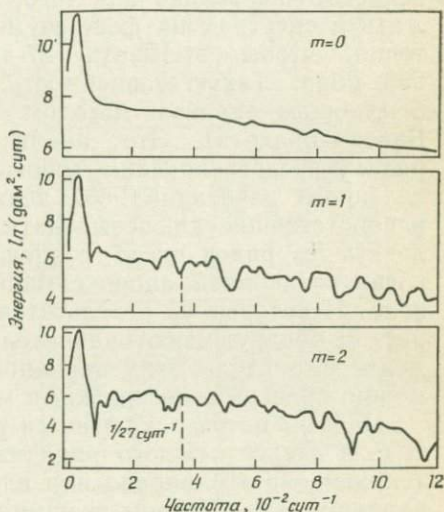


Рис. 3. Разделение по модам 36 спектров на 60° с. ш.

тельный интервал для спектральной плотности S_{xx} был равен $(0,73; 1,3)S_{xx}$ [4]. На рис. 2 показаны типичные спектры для двух точек регулярной сети, относящихся к средним широтам. Они имеют отчетливый пик с периодом в 1 год (не показан на рисунке) без какого-либо увеличения мощности в области частоты f_0 . С другой стороны, если изобразить мощность составляющей f_0 по 36 точкам сети при фиксированной широте, то получим долготную зависимость с преобладающей компонентой $m=2$ в средних широтах [2]. Пытаясь определить поведение спектра в области частоты f_0 , с помощью анализа Фурье для каждого значения частоты были рассчитаны мощности в 36 спектрах. На рис. 3 показаны первые три моды для

параллели 60° с. ш. Заметим, что спектры отдельных мод сходны со спектрами, полученными в одиночных точках, и нельзя выделить каких-либо характерных особенностей вблизи частоты f_0 . То же самое относится и к областям более низких и более высоких широт.

3. МЕТОД НАЛОЖЕННЫХ ЭПОХ

Можно предположить, что солнечное влияние на атмосферу недостаточно велико для того, чтобы его можно было обнаружить в спектрах на фоне шумов, но тем не менее оно достаточно, чтобы вызывать 27-дневные вариации на уровне 500 мбар. Такую зависимость, вероятно, можно обнаружить с помощью анализа методом наложенных эпох (по образцу Байса—Бэллота). Этот анализ был применен к временным рядам, представляющим собой значения высоты уровня определенного давления (9861 день), причем использовались как равноотстоящие ключевые даты, так и ключевые даты, вычисленные из рядов чисел солнечных пятен и ММП с помощью косинусоидальной аппроксимации каждого 27-дневного интервала. Некоторые из результатов анализа, как можно видеть из рис. 4, обнаруживают удивительную периодичность, но тем не менее амплитуды этих вариаций не являются значимыми. Это можно проверить несколькими методами.

Первый метод заключается в сканировании исходного ряда, т. е. в сдвиге каждого ряда на любое заданное число суток (скажем, на 40) вправо или влево с последующим сравнением вариаций [5]. Уровни значимости задаются F -распределением Фишера [6]. Другой метод заключается в сравнении значений амплитуд, полученных при использовании нескольких наборов ключевых дат, каждый из которых имеет равноудаленные, но различные интервалы. В этом методе использовались интервалы в 20; 40; 26,90; 26,91; . . . 27,80 сут. Наконец, наиболее подходящий метод при формировании ключевых дат из рядов чисел солнечных пятен и ММП заключается в организации замкнутых систем циклов. При этом ключевой день внутри последнего цикла становится ключевым днем внутри первого цикла и т. д. или производится сдвиг циклов так, чтобы последняя половина ключевых дат заменялась первой. После этой манипуляции когерентность между числом солнечных пятен или МПП и данными уровня давления, если она и существовала ранее, уже не может проявиться.

Все описанные методы были применены к данным по уровням давления над средними широтами для всего исследуемого периода времени. Анализировались зимние и летние значения

высот уровней давления, а также средние значения в авроральной зоне и на полюсе. Из результатов этих исследований можно сделать следующие выводы:

1. Со всеми упомянутыми выборками ключевых дат почти всегда получались периодические вариации независимо от точной природы ключевых дат (см. рис. 4, а—в). Как уже указывалось, периодическая вариация должна четко проявляться, если в качестве ключевых дат используются данные о числе солнечных пятен и направлении ММП.

2. Анализ с помощью метода сканирования, так же как использование замкнутых циклов и сдвигов ключевых дат, сформированных из данных о числе солнечных пятен и направлении ММП, показал, что получающиеся значения амплитуд и вариаций имеют тот же самый порядок, что и при обычном способе образования ключевых дат (см. рис. 4, в).

3. Каждый раз проводившаяся проверка значимости с помощью F -критерия давала такие значения вероятностей, которые не подтверждают существование периодических вариаций.

В частности, ясно, что если сдвинуть ключевые даты на полпериода (т. е. выбирая сначала 8-й и затем 22-й день солнечного вращения, как это делали Кинг и др. [2], получим

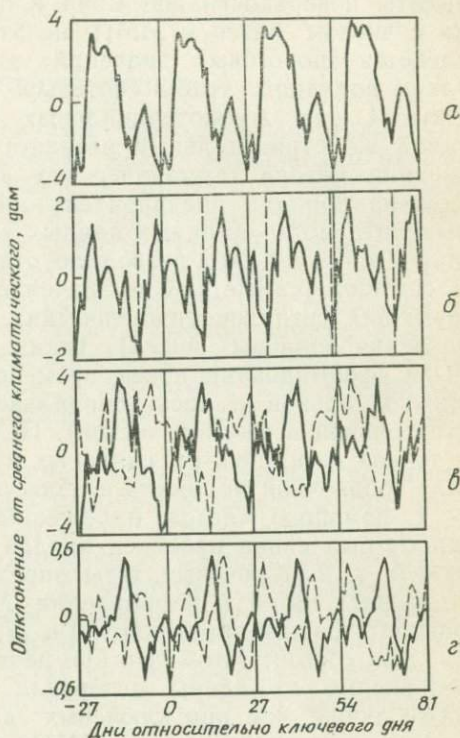


Рис. 4. Метод наложенных эпох. а — уровни поверхности 500 мбар в точке 60° с. ш., 60° з. д. для 27-дневного интервала ключевых дат; б — уровни поверхности 500 мбар в точке 60° с. ш., 60° з. д. для 20-дневного интервала ключевых дат; в — уровни поверхности 500 мбар в точке 60° с. ш., 20° з. д. с ключевыми датами, вычисленными по данным о числе солнечных пятен (сплошная кривая), и ключевыми датами, полученными путем сдвига ключевых дат, вычисленных по числу солнечных пятен (пунктирная кривая); г — синусоидальная составляющая для $m=1$ и 55° с. ш. с ключевыми датами, вычисленными по ММП (сплошная кривая), и с теми же ключевыми датами, но со сдвигом исходного ряда (см. текст; пунктирная кривая).

вариации, которые имеют противоположное отклонение от первоначальных. Поэтому мы заключаем: 27-дневные вариации высоты поверхности 500 мбар в одной точке и когерентность их с числом пятен и ММП нельзя считать значимыми. Что касается «пороговых значений» этого метода, то амплитуды таких вариаций, чтобы считаться значимыми, должны превышать 4 дам (геопотенциальных декаметров). Заметим, что такой же отрицательный результат получается и при использовании метода гармонического круга. В дальнейшем была сделана попытка предварительно с помощью анализа Фурье выделить моды суточных данных уровня давления для каждой широтной зоны, что позволило отделить сигналы планетарных масштабов (самые низкие значения волновых чисел) от сильно шумящих сигналов синоптических масштабов (более высокие значения волновых чисел). Таким образом, для каждой моды были сформированы новые временные ряды суточных значений синусоидальной и косинусоидальной составляющих (или действительной и мнимой частей). Подобно спектрам, полученным в точках сети, спектры синусных и косинусных рядов не содержат добавочной мощности в области f_0 .

С помощью метода наложенных эпох для всех значений широт был снова проведен анализ временных рядов с модами $m=0, 1, 2$. Ключевые даты определялись из данных о числе солнечных пятен и направлении ММП или брались равными равноотстоящим значениям 20 и 27,5 сут. Основной вывод этого анализа состоит в том, что при равноотстоящих ключевых датах независимо от длины интервала периодичность проявляется даже лучше, чем при ключевых датах, полученных из данных о числе солнечных пятен и ММП; при этом уровень значимости (F -тест) всегда имел один и тот же порядок. Кроме того, были также проанализированы сдвинутые и замкнутые временные ряды. Как ожидалось, была получена подобная периодичность со сравнимыми амплитудами.

На рис. 4, *г* представлены результаты анализа методом наложенных эпох синусоидальной составляющей ($m=1$; 55° с. ш.) для ключевых дат, полученных из данных ММП, а также результаты, рассчитанные методом сдвига ключевых дат [5]. Очевидно, что величина дисперсии имеет один и тот же порядок, а F -тест дает отрицательный результат. Устранение шумовой составляющей увеличило разрешающую способность. Амплитуда волн $m=1$ (рис. 4, *г*), вызванной солнечным вращением, чтобы превысить уровень шума, должна превышать по крайней мере 0,6 дам. Подобные значения имеют место для $m=0$ и $m=2$. В заключение отметим, что результаты анализа методом наложенных эпох не являются значимыми, несмотря на то, что иногда проявляются удивительно четкие периодич-

ности, и никакой связи между числом солнечных пятен, направлением ММП или постоянным вращением Солнца с высотой уровня поверхности 500 мбар обнаружено не было.

4. КВАДРАТИЧНЫЕ ОЦЕНКИ КОГЕРЕНТНОСТИ

Чтобы подтвердить указанный вывод, были вычислены квадратичные оценки погрешности между временными рядами чисел солнечных пятен, направлений ММП и рядами с коэффициентами мод $m=0, 1, 2$; их значимость рассчитывалась с помощью формул Дженкинса и Ваттса [4]. На первый взгляд кажется, что этот анализ снова показывает связь между солнечным вращением и планетарными волнами, так как около $1/3$ из 60 спектров когерентности (составляющие синуса и косинуса на 15 широтах по отношению к числу солнечных пятен и ММП) для $m=1$ на частоте f_0 достигают или превышают 95 %-ный доверительный предел. Для $m=0$ и $m=2$ доля таких спектров равна 20 %.

Чтобы проверить еще раз эти результаты, провели смешение временных рядов с определенными коэффициентами мод описанным выше образом, так чтобы первые половины рядов чисел солнечных пятен и направлений ММП приходились теперь на последнюю половину ряда с заданными коэффициентами моды. При этом когерентность должна исчезнуть вследствие большого временного запаздывания. Ничего удивительного, что в данном случае область спектра со «значимым» пиком при f_0 является такой же, а пики так же высоки, как и в первоначальном спектре.

Для объяснения можно показать, что 27-дневный период (особенно у волны $m=1$) имеет большую устойчивость, подобно числу солнечных пятен и направлению ММП (см. рис. 1), так что может иметь место высокая степень коррелированности. Вероятность равномерного распределения разности фаз в течение всего цикла уменьшается в той же степени, что и число временных интервалов с устойчивым 27-дневным периодом (большие значения распределения разности фаз). Это приводит к предпочтению определенной фазы и сильной когерентности. Поэтому если исследуется только короткий временной период продолжительностью в несколько лет или зимних сезонов, то можно ожидать довольно большой степени когерентности. Однако это не доказывает физической связи между солнечным вращением и планетарными волнами. Следует отметить, что разложение каждой моды на волны, распространяющиеся в западном и восточном направлениях, и на стоячие волны (см., например, [7]) также не содержит какой-либо составляющей с периодом около 27 сут. Для надежного выде-

ления такой составляющей требуется амплитуда по крайней мере в 0,4 дам.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью установления связи между параметрами солнечного вращения и колебаниями уровня 500 мбар были использованы несколько методов статистического частотного анализа и метод наложенных эпох. Несмотря на то что использовались длинные временные ряды продолжительностью в 9861 день, ни один из примененных методов не позволил выделить значимую составляющую с периодом, близким к 27-дневному периоду вращения Солнца. Если имеются планетарные волны, вызванные солнечным вращением, то их амплитуды на этой высоте должны быть менее 0,4 дам. Этот результат соответствует результату Волланда [8], который предсказал изменение высоты уровня 500 мбар на величину около 0,1 дам, что ниже уровня обнаружения.

Литература

1. *Wilcox J. M., Svalgaard L., Scherrer P. H.* J. Atmos. Sci., **33**, 1113, 1976.
2. *King J. W., Slater A. J., Stevens A. D., Smith R. A., Willis D. M.* J. Atmos. Terr. Phys., **39**, 1357, 1977.
3. *Svalgaard L.* Interplanetary magnetic sector structure. Geophysical paper R-29, Danish Meteorological Institute, Charlottenlund, 1972.
4. *Jenkins G. M., Watts D. G.* Spectral analysis and its applications, Holden-Day, San Francisco, 1968. [Имеется перевод: *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения.— М.: Мир, вып. 1, 1971; вып. 2, 1972.]
5. *Taubenheim J.* Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten, Akademische Verlagsgesellschaft Geest and Portig, Leipzig, 1969.
6. *Fisher R. A.* Statistical methods for research workers, Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 1941.
7. *Pratt R. W.* J. Atmos. Sci., **33**, 1060, 1976.
8. *Volland H.*, this volume, 1979 (с. 295 настоящей книги).

РОЛЬ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В СОЛНЕЧНО-АТМОСФЕРНЫХ СВЯЗЯХ И ОБНАРУЖЕНИЕ СИЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ АТМОСФЕРЫ

Р. Дж. Ханг, Р. Е. Смит

Рассмотрена роль гравитационных волн в осуществлении взаимосвязи между солнечным ветром и ионосферой, ионосферой высоких и низких широт, ионосферой и нейтральной атмосферой. Приводятся примеры обнаружения торнадо, опускающихся от локальных источников гравитационных волн.

1. ВВЕДЕНИЕ

Гравитационные волны являются результатом ряда импульсных возмущений, таких как джоулев разогрев, возмущения авроральной электроструи во время геомагнитных суббурь, обращения динамо-экваториальной электроструи, сильные грозы, торнадо и ураганы в тропосфере. Детальное понимание источников и стоков гравитационных волн существенно улучшит наши знания энергетики процессов связи между солнечным ветром, ионосферой и атмосферой.

Возбуждение крупномасштабных гравитационных волн зависит от геомагнитной активности. Титеридж [1] показал, что необходимым условием является $K_p > 5$, а Тестуд [2], исходя из наблюдений нейтрального ветра в F -области, высказал предположение, что крупномасштабные гравитационные волны появляются при $\sum K_p > 16$. Здесь K_p — трехчасовой индекс геомагнитной активности, и \sum — сумма таких индексов за сутки.

Среднемасштабные гравитационные волны могут возбуждаться как сильными бурями, так и геомагнитными возмущениями. Недавно с помощью доплеровского зондирования (CW)* верхней атмосферы было показано, что имеются ионосферные возмущения, которые ассоциируются с резкими изменениями погоды [3—6].

R. J. Hung. The University of Alabama in Huntsville, AL 35807 USA.
R. E. Smith. NASA/Marshall Space Flight Center, AL 35812 USA.

* Модуляция несущей частоты.— *Прим. перев.*

2. СОЛНЕЧНО-АТМОСФЕРНЫЕ СВЯЗИ

Робертс и Олсон [7], а также Уилкоккс [8] исследовали развитие ложбин низкого давления на уровне давления 300 мбар в северной части Тихого океана и Северной Америки. Они нашли, что ложбины формируются в заливе Аляска через 2—4 дня после обращения полярности солнечного магнитного поля или прохождения секторной границы межпланетного магнитного поля (ММП). Корреляции между изменениями направления ММП и изменениями в верхней атмосфере, а также между передачей энергии и количества движения от солнечного ветра земной атмосфере можно детально изучить на основе анализа источников и стоков гравитационных волн.

2.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИОНОСФЕРОЙ

Основываясь на данных об ионном составе, полученных с помощью КА «ОГО-6» и «АЕ-С» Тейлор и др. [9] показали, что на границе авроральной зоны и области полярной шапки наблюдается четкая корреляция между увеличением скорости дрейфа ионов и изменением направления ММП. Независимое изучение данных «ОГО-6» и «АЕ-Е» позволило выявить волнообразные флуктуации концентраций H^+ , O^+ и NO^+ . Анализ стоков и источников гравитационных волн может расширить наши представления о процессах, связывающих возмущения в солнечном ветре с аномальными явлениями в авроральной и экваториальной зонах. Результаты работы Тейлора и др. [10] указывают на связь морфологии вариаций концентрации H^+ вблизи экваториальной аномалии с переменными экваториальными электрическими полями и нейтральными ветрами. Это наводит на мысль о том, что систематический анализ источников гравитационных волн, связанных с долго- и временно-вариациями ионного состава, поможет нам лучше разобраться во внешних и внутренних процессах, воздействующих на систему магнитосфера—ионосфера—атмосфера.

2.2. ВЗАИМОСВЯЗЬ ВЫСОКОШИРОТНОЙ И НИЗКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Хорошо известно, что геомагнитные суббури и возмущения авроральной электроструи в большей степени влияют на процессы взаимодействия между магнитосферой, ионосферой и атмосферой. Авроральные и экваториальные электроструи также генерируют гравитационные волны.

Для обнаружения источников крупномасштабных гравитационных волн, наблюдавшихся на средних широтах в F -области ионосферы использовался метод построения семейства обратных траекторий волн (reverse ray tracing technique) [4]. Результаты этих исследований показали, что более чем в десяти случаях вычисленные положения источников волн находились в авроральной зоне на высотах полярных сияний. На рис. 1 представлена расчетная траектория для одного такого события, наблюдавшегося 3 апреля 1974 г. в период с 22 00 по 4 00 UT на ионосферной станции Эррей-Хантсвилл на Аляске с помощью высокочастотного доплеровского зондирования (HF—CW)*. Индекс ΣK_p равнялся 36 и трехчасовой индекс K_p был равен 6, когда возбуждались волны, которым требовалось 3 ч 20 мин, чтобы пройти путь от расчетного источника до приемника. Эти результаты показывают, что изучение источников и стоков гравитационных волн способствует пониманию процессов, которые осуществляют взаимосвязь между низкоширотной и высокоширотной ионосферой.

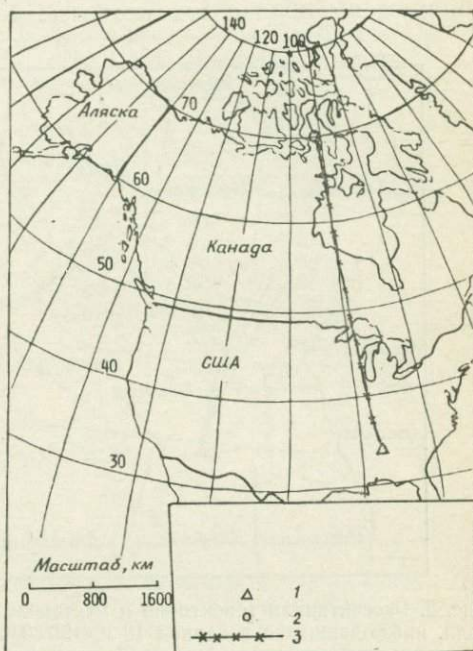


Рис. 1. Рассчитанная траектория крупномасштабных гравитационных волн, связанных с авроральной активностью, отмеченной 3 апреля 1974 г. от 22 до 24 ч. UT, и вычисленное расположение источника волн. 1 — расположение станции наблюдения, 2 — местоположение источника, 3 — траектория волн.

2.3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ

Госсард и Свизи [11] предположили, что гравитационные волны в атмосфере могут возбуждаться грозами и атмосферными фронтами. Ханг и др. [5], а также Ханг и Смит [6]

* Модуляция высокой несущей частоты.— Прим. перев.

с помощью высокочастотного доплеровского зондирования обнаружили гравитационные волны на высотах области F_2 , связанные с сильными бурями. Результаты изучения более чем 20 случаев зондирования показывают, что источники волн были обнаружены вблизи тех мест, где более чем через час зароди-

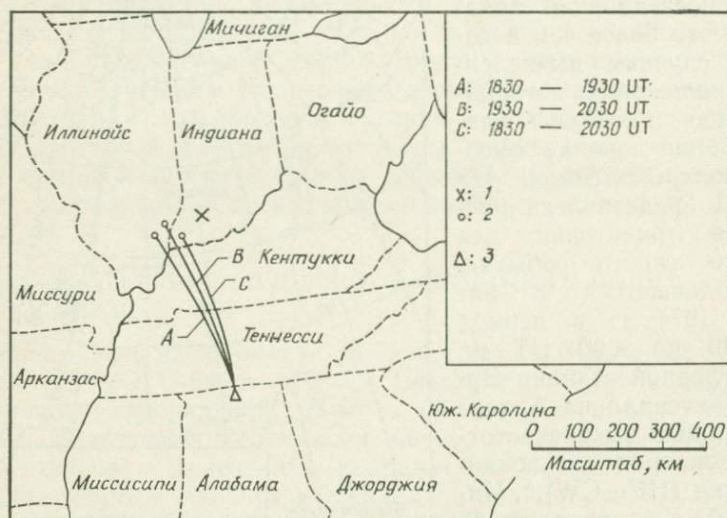


Рис. 2. Рассчитанная траектория и местоположение источника гравитационных волн, наблюдавшихся в период 1830—2030 UT 13 января 1976 г., и местоположение опустившегося торнадо. 1 — место опускания торнадо, 2 — расчетное положение источника волн, 3 — расположение станции.

лись торнадо. Это свидетельствует о том, что гравитационные волны также играют важную роль в осуществлении взаимосвязи между ионосферой и тропосферой в периоды сильных бурь.

Рассмотрим результаты подробных исследований гравитационных волн, связанных с тремя изолированными торнадо, появившимися 13 января 1976 г. На рис. 2 показаны траектории трех гравитационных волн, наблюдавшихся в периоды 1830—1930, 1930—2030 и 1830—2030 UT. Одинокое торнадо обнаружилось в 19 ч 15 мин. Расчетное время распространения волны от источника до приемника равнялось 55 мин; следовательно, гравитационные волны были возбуждены более чем за 1 ч до появления торнадо. Два других изолированных торнадо были отмечены в 20 14 и 20 50 мирового времени. Из рис. 3 видно, что торнадо образовалось в юго-западном секторе штата Индиана и распространилось через центральные районы штата

в центр южной Индианы. Это прекрасно согласуется с расчетным местоположением источников волн, наблюдавшихся в период 18 30—20 60 UT, и продвижением фронтального шквала в период 17 35—20 35 UT.

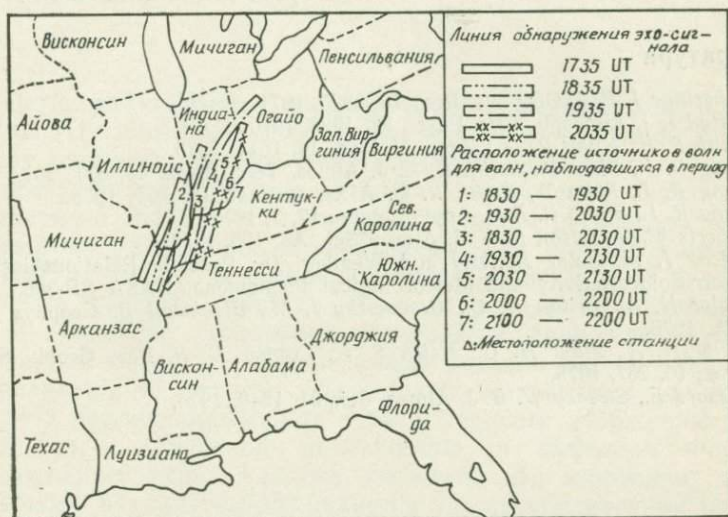


Рис. 3. Сравнение движения рассчитанного положения источника волны и движения фронтального шквала 13 января 1976 г. от 17 35 до 20 35 UT, когда возбуждались наблюдаемые гравитационные волны.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

О существовании связи между солнечным ветром и земной атмосферой свидетельствует явная корреляция между увеличением скорости дрейфа ионов и изменением направления ММП. Было также показано, что гравитационные волны играют важную роль в передаче импульса и энергии от солнечного ветра к земной атмосфере. Из проведенного анализа следует, что гравитационные волны являются связующим звеном между ионосферой высоких и низких широт.

Что касается корреляции между гравитационными волнами и динамикой атмосферы, то, как полагают, гравитационные волны могут возбуждаться проникающей конвекцией. Настоящая работа показывает, что гравитационные волны, связанные с торнадо, возбуждались на фронте шквала, и это подтверждает предположение Госсарда и Свизи [11]. По-видимому, изучение гравитационных волн может углубить наши представления как о процессах, осуществляющих ионосферно-атмосферные связи, так и о механизмах образования сильных бурь.

Наиболее мощным средством изучения динамических связей между солнечной и земной атмосферой являются одновременные наблюдения с орбитальных космических аппаратов, радиозондов и наземных станций доплеровского зондирования для установления источников и стоков гравитационных волн.

Литература

1. *Titheridge J. E. J. Geophys. Res.*, **76**, 6955, 1971.
2. *Testud J. J. Atmosph. Terr. Phys.*, **32**, 1793, 1970.
3. *Smith R. E., Hung R. J. J. Appl. Meteor.*, **14**, 1611, 1975.
4. *Hung R. J., Phan T., Smith R. E. J. Atmos. Terr. Phys.*, **40**, 831, July 1978.
5. *Hung R. J., Phan T., Smith R. E. AIAA Journal*, **16**, 763, 1978.
6. *Hung R. J., Smith R. E. J. Appl. Meteor.*, **17**, 3, 1978.
7. *Roberts W. O., Olson R. H. J. Atmos. Sci.*, **A3**, 135, 1973.
8. *Wilcox J. M. Solar Activity and Weather. In: Possible Relationships Between Solar Activity and Meteorological Phenomena, NASA SP-366*, 1975.
9. *Taylor H. A., Briton H. C., Grebowsky J. M., Blackwell B. Geophys. Res. Lett.*, 1978.
10. *Taylor H. A., Mayr H. G., Hsieh S. L., Cordier G. R. Rev. Geoph. Space Phys.*, **16**, 267, 1978.
11. *Gossard E., Sweezy W. B. J. Atmos. Sci.*, **31**, 1540, 1974.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОБМЕНА МЕЖДУ СТРАТОСФЕРОЙ И ТРОПОСФЕРОЙ

Р. Рейтер

Регистрация ^7Be и O_3 в атмосфере на высокогорной обсерватории (Цугшпитце, высота 3 км) послужила основой для изучения вопроса, влияют ли солнечные вспышки на частоту вторжений стратосферного воздуха в тропосферу. Приток стратосферного воздуха к станции наблюдения регистрировался по заметному увеличению концентрации этих стратосферных компонент. С 1973 г. мы сумели идентифицировать 40 %-ное увеличение частоты стратосферных вторжений в периоды от 2 до 3 сут после солнечных вспышек и прохождений границ секторной структуры. Проведенные недавно исследования были направлены на поиски физических механизмов и выявили тесную корреляцию между стратосферными вторжениями, связанными с солнечной активностью, и эффектом Форбуша. В последнее время удалось показать, что вторжение стратосферного воздуха сопровождается также увеличением концентрации O_3 в стратосфере, главным образом в ее нижних слоях.

В предыдущих работах [1, 2] на основе измерений в течение нескольких лет нам удалось показать, что частота вторжений стратосферного воздуха значительно увеличивается после солнечных вспышек. В настоящей статье представлены самые последние результаты, основанные не только на большем объеме данных, но и на новых специфических исследованиях. Например, в качестве возможного физического звена рассмотрен профиль стратосферного O_3 . Из-за недостатка места мы не сможем дать здесь подробный обзор литературы, относящейся к этому вопросу.

На рис. 1 представлена простая и наглядная иллюстрация экспериментальной схемы наших исследований. В нижней стратосфере, т. е. в слое на высотах около 15—25 км, высокоэнергичные протоны порождают радиоактивные изотопы, например ^7Be , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , в процессе расщепления атомов атмосферных газов. Скорость их образования в тропосфере много меньше, и ею можно пренебречь. Радиоактивные аэрозоли инжестируются из стратосферы (время пребывания в ней при-

R. Reiter. Institute for Atmospheric Environmental Research of the Fraunhofer Society, D-8100 Garmisch-Partenkirchen, West Germany.

мерно от 30 до 100 дней) в тропосферу (где время пребывания их всего несколько дней) путем процессов вторжения [3], главным образом в районах разрыва тропопаузы в окрестности струйного течения.

В тропосфере радиоактивные изотопы мигрируют вдоль изэнтропических поверхностей, зависящих от крупномасштаб-

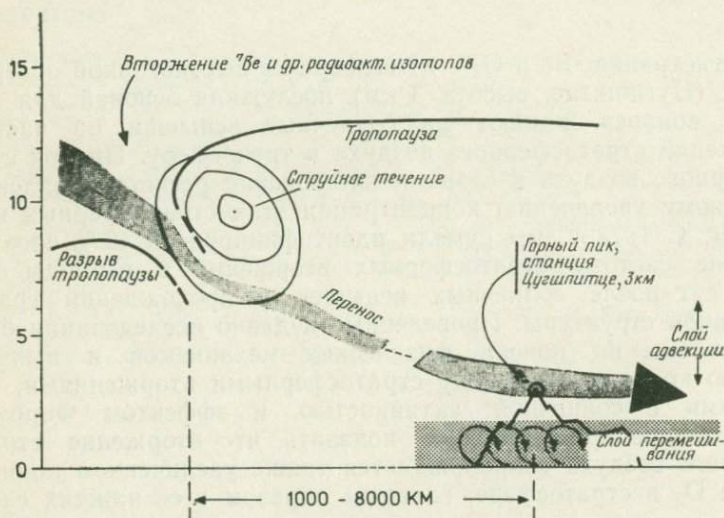


Рис. 1. Схема определения стратосферных вторжений с помощью измерений радиоактивных изотопов, которые непрерывно регистрировались начиная с ноября 1969 г. на станции Цугшпитце, расположенной на высоте 3 км над слоем перемешивания.

ной метеорологической ситуации, к нашей станции наблюдения, расположенной на высоте 3 км, где они регистрируются начиная с осени 1969 г. Станция расположена в слое свободной адвекции, как правило над слоем перемешивания. Острые пики в регистрации, например ^{70}Be , указывают на то, что стратосферные массы воздуха достигли станции наблюдения. Концентрации O_3 в воздухе регистрируются на этой же станции. Кроме того, мы недавно провели зондирование O_3 после вспышек на Солнце с помощью радиозонда, позволяющего измерять общее содержание O_3 с помощью спектрометра O_3 . Здесь необходимо отметить, что вариации концентрации радиоактивных изотопов на станции Цугшпитце (амплитуда около одного порядка величины) невозможно объяснить вариациями скорости генерации этих изотопов, и для этого надо привлечь поступление их из стратосферы, с одной стороны, и тропосферный сток аэрозолей (облачное вымывание) — с другой.

С увеличением количества накопленных данных за период в 8 лет, получили подтверждение наши прежние выводы о том, что частота стратосферных вторжений (отмечаемых по заметному увеличению концентрации ^7Be) значительно увеличивается после $+/-$ или в течение $-/+$ прохождений секторных границ межпланетного магнитного поля, хотя при последних прохождении и в фазе уменьшения солнечной активности амплитуды оказались несколько меньшими. В частности, было показано, что эффект после прохождений $+/-$ значительно слабее, чем после прохождений $-/+$. В последнем случае мы наблюдали в день прохождения удвоение частоты стратосферных вторжений зимой и весной. В отличие от этого мы отметили летом и осенью минимальное число в день прохождения, но максимальное (удвоение) вторжений на 5-й день после прохождения. Это мы подробнее рассмотрим позднее в другой статье.

В полном согласии с нашими прежними наблюдениями на рис. 2 показано изменение частоты стратосферных вторжений после солнечных вспышек в линии Na . Соответственно было найдено как для всего ряда данных наблюдений (8 лет, 216 ключевых дней), так и для различных фаз солнечной активности увеличение вторжений примерно на 40—50 % начиная со дня вспышки и по вторые сутки после нее. Среднеквадратичные отклонения (вертикальные отрезки) подтверждают значимость этой корреляции. На рис. 3 показано, что изменение O_3 в фазе с изменением ^7Be может наблюдаться на станции Цугшпитце (амплитуда около 30 %) даже во время фазы ослабления солнечной активности. (Поскольку O_3 регистрировался всего лишь два года, наблюдаемое число случаев сравнительно мало.) Теперь стало ясно, что после вспышек на Солнце O_3 также переносится стратосферным потоком воздуха и измеряется на станции наблюдения наряду с ^7Be . Примечателен тот факт, что изменение общего содержания атмосферного озона выглядит совершенно иначе (рис. 3, внизу): мы получили значительный максимум общего содержания O_3 (амплитуда 5—10 %) в день перед вспышкой (в период уменьшения солнечной активности — за двое суток перед вспышкой). Это означает, что процесс, воздействующий на стратосферу, начинается, когда активная область (M -область) приближается к центральному меридиану Солнца.

Мы лучше стали интерпретировать корреляции, среди которых мы теперь рассматриваем и плотность потока нейтронов (вызванных галактическими космическими лучами) по результатам ее регистрации на поверхности земли (используются данные станции в Серных горах).

С активными областями на Солнце и солнечными вспышками связан известный эффект Форбуша, т. е. уменьшение

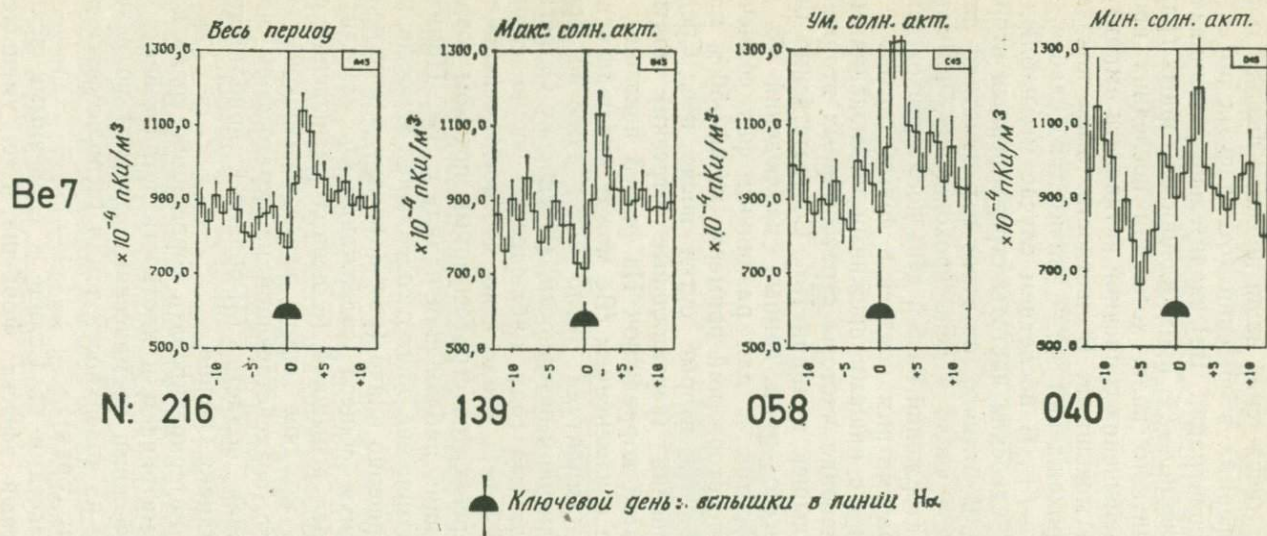


Рис. 2. Концентрация ${}^7\text{Be}$ как мера частоты стратосферных вторжений до и после солнечных вспышек в линии H_{α} (максимум достигается через 2—3 дня после вспышки). На этом рисунке, а также на рис. 3—6 приведены результаты, полученные методом наложенных эпох относительно ключевых дней, которые указаны в нижней части каждой диаграммы. Такой анализ покрывает период в 12 дней до и 12 дней после ключевого дня. Анализируемый параметр приведен на левой вертикальной оси графиков. Вертикальные отрезки прямых дают среднеквадратичное отклонение. N — число ключевых дней, использованных в каждом конкретном анализе. Над рисунками обозначены фазы цикла солнечной активности: «весь период» — весь период наблюдений с ноября 1969 г. по декабрь 1977 г., т. е. 8 лет; «макс. солн. акт.» — с ноября 1969 г. по 1972 г. включительно; «ум. солн. акт.» — уменьшение солнечной активности с 1973 по 1975 г.; «мин. солн. акт.» — минимум солнечной активности с 1975 по 1977 г. включительно.

интенсивности галактических лучей в нижней стратосфере и в тропосфере, которое обусловлено поступлением в окрестность Земли областей с магнитным полем повышенной напряженности. Последние часто формируются на переднем крае высо-

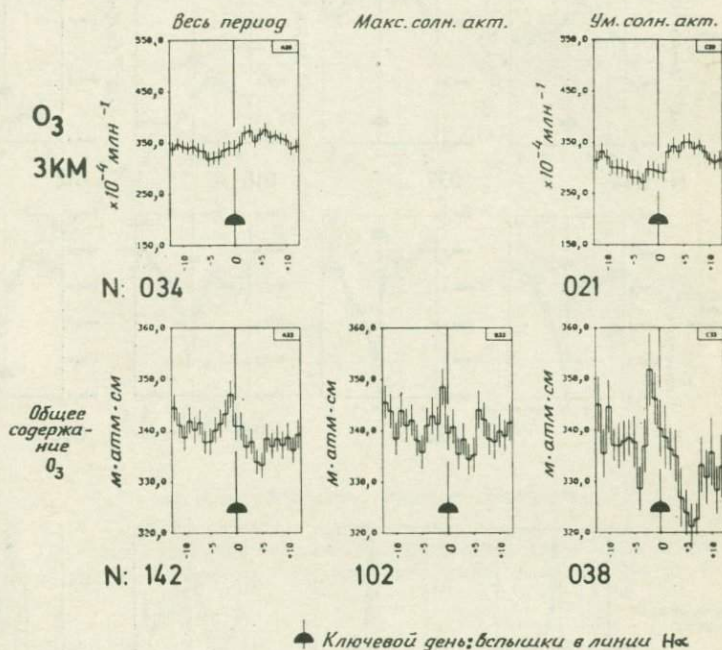


Рис. 3. Диаграммы, аналогичные рис. 2, но для O_3 на той же станции, где регистрировался ${}^7\text{Be}$, и для общего содержания атмосферного O_3 (для O_3 максимум наблюдается за сутки до вспышки).

коскоростных потоков солнечного ветра, которые берут начало либо от вспышки, либо от M -областей [4]. Галактические космические лучи являются преобладающим источником образования ионов и возбужденных атомов азота ниже 20 км [4, 5]; его не превосходит даже интенсивная эмиссия солнечных протонов в редкие периоды [4].

Мы отобрали ключевые дни исходя из записей нейтронного супермонитора, которые иллюстрируют заметный эффект Форбуша. Рис. 4 показывает, что эти ключевые дни следует рассматривать как существенные и для солнечной активности (потока солнечного радиоизлучения), и для плотности потока нейтронов как меры галактической компоненты космических лучей, а также для возмущений магнитного поля Земли (A_p) и распространения радиоволн, отражающих возмущения в ионо-

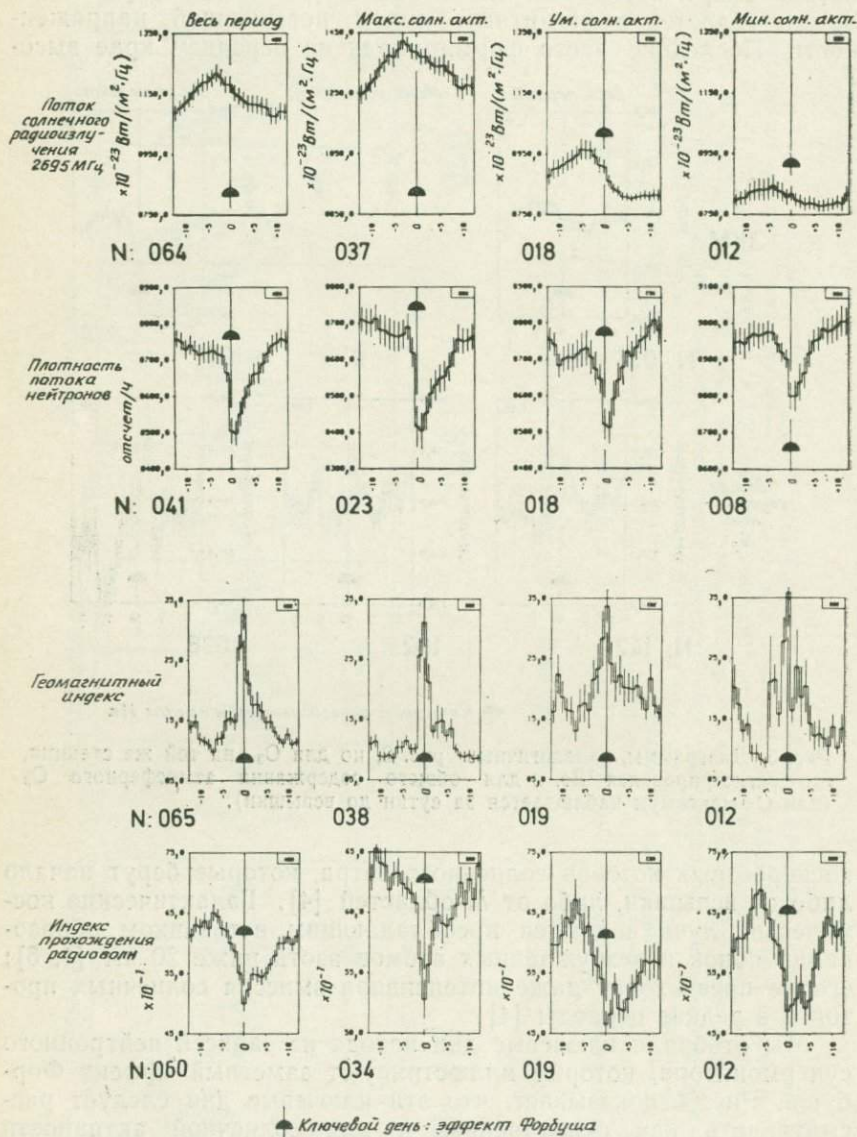


Рис. 4. Вариации различных солнечных и геофизических параметров в окрестностях ключевых дней с эффектом Форбуша.

сфере. При использовании этих ключевых дней с эффектами Форбуша анализ концентрации ^7Be методом наложенных эпох (рис. 5) показал, что содержание ^7Be увеличивается начиная с третьего дня перед ключевым днем и достигает максимума за сутки до ключевого дня (амплитуда около 40%). Однако

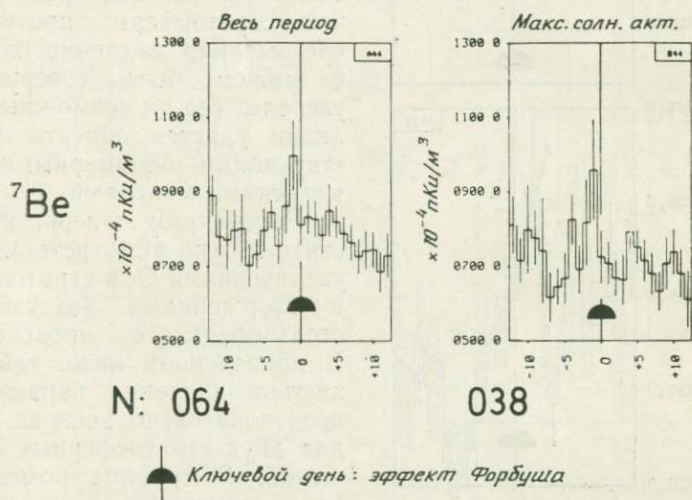
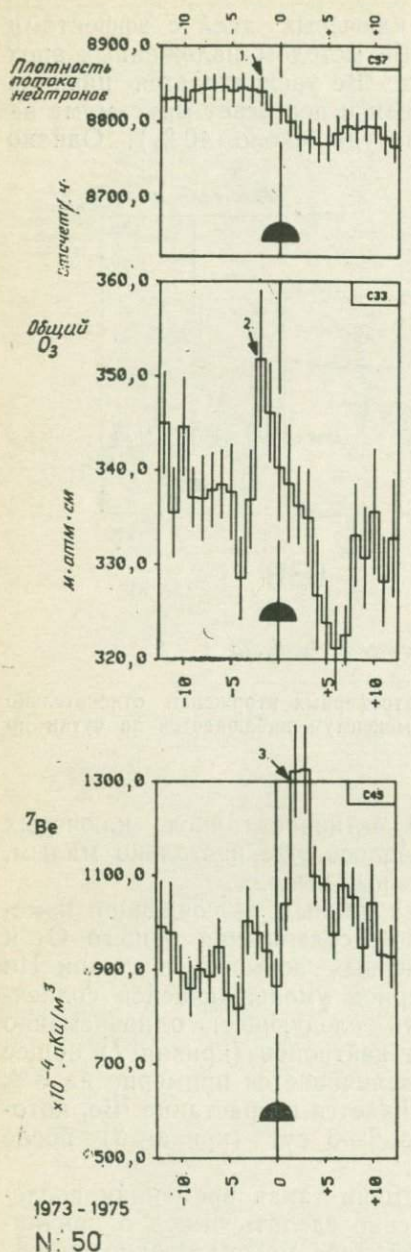


Рис. 5. ^7Be , указывающий частоту стратосферных вторжений относительно ключевых дней с эффектом Форбуша; максимум наблюдается за сутки до вспышки.

в период уменьшения солнечной активности число ключевых дней с эффектами Форбуша оказалось уже настолько малым, что нельзя было сделать определенный вывод.

На рис. 6 представлена сводка данных, включающая изменения плотности потока нейтронов, содержания общего O_3 и ^7Be при использовании 50 солнечных вспышек в линии На в качестве ключевых дней в период уменьшающейся солнечной активности. Можно отметить следующее: одновременно с уменьшением плотности потока нейтронов (кривая 1) общее содержание озона в атмосфере увеличивается примерно на 8% (кривая 2). Через двое суток начинается возрастание ^7Be , который достигает максимума через 2—3 сут (кривая 3) после вспышки (повышение до +40%).

Если даже к настоящему времени такая временная последовательность не позволяет уверенно сделать вывод о причинной связи, мы все же по крайней мере можем предположить, что увеличение концентрации O_3 вызывается уменьшением скорости образования возбужденных атомов азота и закиси азота



Вспышка в линии H_{α}

в начальной стадии фобуш-понижения. В соответствии с имеющимися в настоящее время численными моделями можно предположить, что реакции в газовой среде нижней стратосферы протекают чрезвычайно медленно, но мы не можем быть совершенно уверены, все ли возможные реакции удастся описать существующими одномерными химическими моделями.

Рассмотрим теперь, какую связь можно усмотреть между увеличениями O_3 в стратосфере и вторжениями воздуха из стратосферы в тропосферу. В приведенной ниже таблице даются значения параметров последовательно день за днем для двух стратосферных вторжений. В таблице помещены все имеющие отношение к этому вопросу солнечные и геофизические данные. Начиная с 13 апреля мы ежедневно запускали зонд с озонным спектрометром. По результатам запусков мы получали информацию как об общем содержании O_3 (в удовлетворительном согласии со спектрометрическими измерениями), так и о количестве O_3 , которое находилось в слое между тропопаузой и высотой уровня

Рис. 6. Временная последовательность изменений плотности нейтронного потока, общего O_3 и стратосферных вторжений относительно ключевых дней, относящихся к солнечным вспышкам в линии H_{α} , в период уменьшения солнечной активности.

Среднесуточные значения важных солнечных, геофизических и метеорологических параметров за время, охватывающее два вторжения: одно из них связано со вспышкой 11 апреля, а другое — со вспышкой 13 апреля 1978 г. Отмечены все вариации O_3 , температуры и высоты тропопаузы после уменьшения плотности потока нейтронов и перед поступлением ингредиентов из стратосферы (O_3 , 7Be , выпадения) на высоту 3 км над земной поверхностью

Дни апреля 1978г.		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Вспышки в линии K_c				↑ 2B	↑ 1B	↑ 1B		↑ 1N			↑ 2B		
Число солнечных пятен		126	111	109	107	93	75	61	85	99	100	107	115
Поток солнечного радиационного излучения с дл. волны $10,7 \mu m$		156	155	180	155	145	138	140	137	132	133	145	139
Индекс пражождения радиоволн		12,9	12,3	10,9	13,4	13,2	11,8	13,5	13,5	13,9	12,9	13,8	12,2
Плотность потока нейтронов		65585	63817	63433	64682	64840	61928	60593	59130	58653	58021	59539	
Геомагнитный индекс A_p		6	10	64	29	24	51	19	8	7	19	38	23
Общее содержание в атмосфере	Ароза	—	391	—	414	417	413	—	—	433	385	—	389
	Гармиш	—	—	—	—	—	425	—	—	461	425	431	442
	Хохенпейс	385	388	—	426	422	421	—	422	425	399	395	402
Радиозонд	Общее содержание O_3 , полный интеграл, нбар	—	—	—	—	435	429	508	—	385	425	375	426
	O_3 от тропопаузы до 150 мбар	—	—	—	—	125	119	146	—	84	117	119	105
Температура тропопаузы, °C		-64	-63	-59	-55	-56	-52	-59	-61	-49	-58	-57	-54
Изменение температуры между сутками		+1	+4	+4	—	-1	+4	-7	-2	+12	-9	+1	+3
Высота тропопаузы, км		11,3	11,0	9,5	9,1	9,5	9,0	9,1	9,5	7,5	9,8	10,2	9,2
Циркуляция, 3 км	O_3 , 10^{-3} млн $^{-1}$	49,0	48,8	41,7	41,3	44,3	44,2	37,2	41,2	39,9	43,4	52,2	45,6
	7Be , 10^{-2} пКи/м 3	12,1	4,9	5,2	16,5	15,7	7,7	3,6	4,5	8,5	18,9	10,9	6,7
	Выпадения, 10^{-2} пКи/м 3	3,7	1,3	1,3	2,7	2,2	1,7	1,1	0,8	1,2	2,2	1,6	1,0
	Относительная влажность, %	81	98	96	87	95	80	95	99	75	40	20	75
Время запаздывания				← 1-2 сут ←				← 4 сут ←					

150 мбар над тропопаузой. Отметим, что после вспышки количество O_3 над тропопаузой увеличивается даже сильнее, чем общее содержание O_3 . В результате увеличения содержания O_3 в стратосфере можно было ожидать роста температуры, и действительно, после обогащения стратосферы озоном температура на уровне тропопаузы существенно повышалась, сама тропопауза опускалась, а 7Be , радиоактивные выпадения и O_3 на станции Цугшпитце (высота 3 км) сильно увеличивались. Это означало вторжение стратосферного воздуха в тропосферу.

Мы будем продолжать тщательные исследования и анализ некоторых деталей процессов, следующих за мощными солнечными вспышками и отделенных друг от друга достаточными промежутками времени. В частности, интересно определить тонкую структуру профиля O_3 , вертикальный или горизонтальный перенос O_3 , общее содержание O_3 (спектрометрически) и вертикальные градиенты температуры, ветра и влажности. Только на основе большого числа анализов такого рода мы надеемся продвинуться в поисках физического звена, которое, очевидно, связывает события на Солнце со стратосферными вторжениями. Не исключено, что Ней [6] был прав, считая таким возможным механизмом эффект Форбуша.

Литература

1. *Reiter R.* J. Atm. Terr. Phys., 38, 503, 1976.
2. *Reiter R., Littfuss M.* Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 26, 127, 1977.
3. *Reiter E. R.* U. S. Atomic Energy Commission, 1972.
4. *Dickinson R. E.* Bull. Amer. Met. Soc., 56, 1240, 1975.
5. *Heaps M. G.* BRL Report No. 1938, 1976.
6. *Ney E. P.* Nature, 183, 451, 1959.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЦА НА СРЕДНЕЕ ДАВЛЕНИЕ НА УРОВНЕ МОРЯ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

П. М. Келли

Разложение по основным компонентам аномалий давления на уровне моря в зимнее время за период в 101 год для Европы и Северной Атлантики обнаружило наличие 11-летнего цикла. Этот цикл, очевидно, имеет отношение к долгопериодной модуляции активности солнечных вспышек в течение цикла солнечных пятен.

Упомянутые основные компоненты представляют собой независимую характеристику картины аномалий атмосферной циркуляции. Изменение интенсивности этой картины во времени задается набором коэффициентов.

Спектр вариаций коэффициентов второй основной компоненты (РС2) содержит статистически значимые пики за 11,5 и 3,5 года, свидетельствующие о наличии несинусоидальной 11-летней вариации. Главная особенность пространственной картины РС2 состоит в том, что к западу от Британских островов имеется область усиленной циклонической активности. Такая картина, выявленная по *сезонным* данным, согласуется с *суточной* изменчивостью высоты уровня 500 мбар, сопровождающей солнечные вспышки, о чем уже сообщалось в этом сборнике. Усиление циклонической деятельности локализуется под областью дивергенции и перед аномальной впадиной в верхней атмосфере. Предполагается, что амплитуда 11-летних вариаций возрастает с частотой солнечных вспышек, а атмосферный отклик в вариациях ото дня ко дню изменяется в течение цикла солнечных пятен.

Эта совместимость между короткопериодной связью Солнце—погода и долгопериодной связью Солнце—климат позволяет предложить подход, который поможет избежать проблемы, часто встречающейся в исследовании последней из этих зависимостей. Хотя длина ряда данных может быть достаточной для выдвижения гипотезы, редко имеется достаточно дополнительной информации для строгой проверки этой гипотезы. В данном подходе гипотезы будут основаны не на анализе ограниченного объема климатических данных, а на результатах короткопериодных солнечно-погодных исследований, т. е. надо будет

исходить из следствий или интегральных эффектов в климатических масштабах времени.

Некоторое соотношение фаз между циклом солнечных пятен и 11-летним периодом РС2 обнаруживается в период с 1920 г. по настоящее время, но оно нарушается вблизи начала столетия. Хотя на основе имеющегося ограниченного набора данных нельзя сделать строгих выводов, можно выдвинуть три возможных объяснения, дающие обоснование для дальнейших исследований. Во-первых, число солнечных пятен может и не быть хорошим индикатором тех составляющих солнечных характеристик, которые влияют на атмосферную циркуляцию. Во-вторых, поступление вулканической пыли в стратосферу было минимальным в период с 1920 по 1960 г. Это могло привести к более сильному влиянию Солнца на атмосферную циркуляцию в указанный период; в другое время вулканическая деятельность может маскировать солнечное воздействие. И в-третьих, число солнечных пятен было существенно выше после 1920 г., чем до него.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РЕАКЦИИ СТРАТОСФЕРНОЙ ХИМИИ НА ВЫСЫПАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЧАСТИЦ: ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РОЛЬ $N_2(A^3\Sigma)$ И ХИМИИ ИОНОВ

Ш. С. Прасад

Появление большого количества долгоживущих молекул $N_2(A^3\Sigma)$ обусловлено потерями энергии высыпающихся солнечных частиц. Лабораторные данные свидетельствуют о том, что в стратосфере происходит интенсивное преобразование $N_2(A^3\Sigma)$ в N_2O . Молекулы N_2O посредством реакции с $O(^1D)$ могут в значительной степени способствовать образованию NO и тем самым длительно влиять на характер химических реакций в стратосфере. Днем отрицательные ионы могут преобразовывать активные молекулы NO_x в стабильные HNO_3 , а ночью как положительные, так и отрицательные ионы в процессе химических реакций образуют молекулы NO_x . Неучет ионной химии приводит к значительной недооценке истощения O_3 в начальной фазе солнечных возмущений и тем самым к существенным ошибкам в оценке природы быстрых откликов стратосферы на эти возмущения. Для дальнейшего развития этой проблемы необходимы расчеты по более совершенным моделям, а также дополнительные лабораторные проверки некоторых ключевых предположений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Время от времени выдвигаются гипотезы о влиянии солнечной активности на атмосферу. Эти предположения включают 1) учет атмосферного электричества; 2) прямое и косвенное влияние ионов, образованных под воздействием космических лучей и рентгеновского тормозного излучения в ядрах конденсации на высотах вблизи тропопаузы; 3) влияние возможных вариаций в химическом составе стратосферы и мезосферы, в тепловом балансе и динамике в зависимости от вариаций солнечных корпускулярных потоков и электромагнитной радиации [1—5].

Очевидно, электрические характеристики атмосферы могут изменяться очень быстро и их воздействия на активность гроз

могут быть мгновенными. Но звенья связи между возрастанием грозовой активности и ключевыми элементами погода—климат, а также соответствующие постоянные времени относятся пока к области неизученных предположений. Чтобы установить роль ионизации как пускового механизма при формировании обширных полей перистых облаков, необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Существуют количественные и полуколичественные исследования, которые показывают, что изменения стратосферно-мезосферных полей ветра, а также химической и тепловой структуры атмосферы могут влиять на земную систему погода—климат в разных масштабах времени — от нескольких дней до геологических эпох [6—8]. Поэтому существенно, чтобы все те физические процессы, которые могут определять природу реакции стратосферы и мезосферы на изменчивость солнечной активности, были идентифицированы и изучены настолько полно, насколько это возможно в рамках современного уровня развития науки. Эта статья представляет собой предварительные результаты наших усилий в этом направлении, акцентируя внимание на явления, связанные с корпускулярными солнечными потоками.

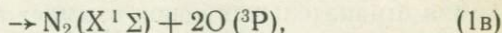
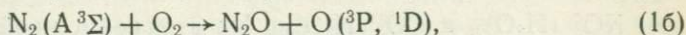
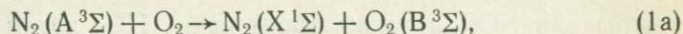
2. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РОЛЬ ВОЗБУЖДЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОЛЕКУЛЫ $N_2(A^3\Sigma)$

Поскольку молекулы N_2 являются основным компонентом атмосферы, поэтому значительное количество возбужденных молекул N_2 в триплетном состоянии создается в процессе поглощения энергии вторгающихся солнечных частиц.

Более высокоэнергетические состояния, такие, как триплеты C^3P_u и V^3P_g , при каскадных переходах в нижнее состояние $A^3\Sigma$ производят излучение 1-й и 2-й положительной системы полос. Прямое возбуждение и вклад от каскадных переходов приводят к скорости образования примерно $0,35 N_2(A^3\Sigma)$ на 1 пару ионов. Данное состояние является метастабильным с большим радиативным временем жизни от 1,27 до 2,5 с. Следовательно, в атмосфере и нижней мезосфере молекулы, находящиеся в состоянии $A^3\Sigma$, подвергаются многочисленным столкновениям. Поскольку гашение $A^3\Sigma$ на N_2 идет медленно, а концентрация O слишком низкая, то для стратосферы существенно гашение $A^3\Sigma$ только на O_2 .

Поскольку превращение большого количества энергии (~ 6 эВ) электронов в энергию поступательного движения за-

труднительно, то физически наиболее вероятными оказываются следующие процессы гашения:



Реакция (1г) требует значительной химической перестройки, по сравнению с другими ею можно пренебречь. Прямые определения вероятности процессов (1a) или (1в) отсутствуют. С другой стороны, бомбардировка смеси газа $\text{N}_2\text{—O}_2$ нейтронами с энергией 14 МэВ [9] в лабораторных условиях приводила к образованию только двух компонент N_2^{13}N и N^{13}NO . Таким образом, мы предполагаем, что наиболее вероятным взаимодействием $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma)$ с O_2 является реакция (1б) с коэффициентом скорости $8 \cdot 10^{-12}$ см³/с [10]. Согласно этому предположению, в стратосфере и нижней мезосфере почти все молекулы $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma)$ непосредственно или косвенно преобразуются в молекулы N_2O .

3. ХИМИЯ ИОНОВ

Как известно, образование HO_x в реакциях химии положительных ионов играет решающую роль в уменьшении мезосферного O_3 при вторжении потоков протонов. При этом следует отметить, что а) даже если молекулы HO_x непосредственно не оказывают влияния на баланс стратосферного O_3 , то они могут влиять косвенно, например посредством разрушения активных молекул ClO , и б) значительную роль может играть химия отрицательных ионов.

На рис. 1 представлена упрощенная схема химии отрицательных ионов, не включающая процессы образования гидратов. Очевидно, O_4^- , CO_2^- , CO_3^- поглощают молекулы азотных соединений NO , NO_2 , прежде чем происходит превращение в конечный продукт в ионы NO_3^- .

В стратосфере почти все отрицательные частицы являются гидратными отрицательными ионами и рекомбинируют благодаря взаимной ион-ионной нейтрализации. Для ионов гидратов процесс нейтрализации посредством простых процессов передачи электронов становится маловероятным не только по соотношениям энергетики [12—14], но также из-за неблагоприятных значений факторов Франка—Кондона [15]. Таким образом, для стратосферы и нижней мезосферы нейтрализация отрицательных ионов с наибольшей вероятностью происходит при слия-

нии их с положительно заряженными ионами гидратов. Следовательно, становится возможным образование HNO_3 путем нейтрализации NO_3^- , а также образование HO_x путем нейтрализации $\text{NO}_3^- (\text{H}_2\text{O})_n$ и $\text{CO}_3^- (\text{H}_2\text{O})_m$. По этой возможной схеме днем химия отрицательных ионов изымает активные NO_x и трансформирует их в малоактивные HNO_3 . Ночью, когда конечным результатом взаимодействий являются ионы O_4^- , CO_3^- или CO_4^- ,

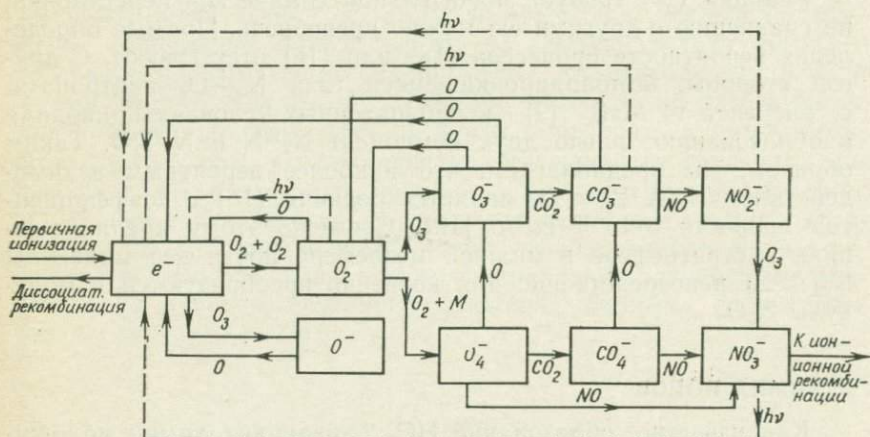


Рис. 1. Упрощенное схематическое представление химии отрицательных ионов.

трудно провести различие в химии между положительными и отрицательными ионами, поскольку те и другие производят HO_x .

4. РАСЧЕТ ПО МОДЕЛИ

Чтобы сравнить возможности двух классов физических процессов, описанных в разд. 2 и 3, проведены расчеты, использующие одномерную динамическую фотохимическую модель атмосферы, разработанную Турко и Уитеном [16]. Профиль ионизации рассчитывался Риганом [17] для солнечного протонного события в августе 1972 г. Такой профиль, взятый в пиковом значении, «включался» в середине дня и оставался постоянным в течение последующих 6 ч. Затем ионизация начинала уменьшаться с такой постоянной времени, при которой скорость ионизации через 24 ч падала до 1/10 величины пикового значения. Концентрации положительных и отрицательных ионов, а также электронов рассчитывались при использовании значений эффективных коэффициентов рекомбинации и параметров солнечных протонных событий из [18].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В табл. 1 представлены результаты, относящиеся к образованию N_2O под действием вторгающихся частиц. Для предполагаемого профиля ионизации на всех высотах выше 40 км отчетливо прослеживается увеличение концентрации N_2O . С высотой увеличивается относительное содержание N_2O , в районе стратосферы оно достигает значения $\sim 60\%$. Эта увеличенная концентрация остается постоянной в течение нескольких дней и после того, как выпадение частиц падает до нуля. Это является следствием очень большого времени жизни N_2O в интересующей нас области атмосферы. Чтобы понять значение возрастания N_2O , необходимо отметить, что на всех высотах его количество составляет около 33% от общего увеличения окислов азота ($NO + NO_x$). Возможно, что после прекращения вторжения частиц избыток N_2O может реагировать с $O^1(D)$, что компенсирует первоначальный вклад NO_x .

Современные теоретические расчеты предсказывают, что к 19-му дню после августовских событий 1972 г. происходит почти полное восстановление O_3 в стратосфере до его концентрации в невозмущенных условиях. Однако экспериментальные наблюдения показали, что недостаток озона долго не восстанавливался и после 19 дней. Постепенное образование NO из избыточного количества N_2O может объяснить результаты наблюдения, но одномерные вычисления для таких длинных промежутков времени, к сожалению, лишены физического смысла из-за пренебрежения горизонтальным переносом. Следовательно, такую возможность, вытекающую из предположенной в этой статье гипотезы, следует проверять на двумерной модели.

В стратосфере HNO_3 имеет большое время жизни, определяемое несколькими (~ 6) часами. Благодаря этому для дневного роста ионизации значительное увеличение HNO_3 должно быть весьма заметным признаком быстрого отклика стратосферы. Это ясно видно из результатов табл. 2 для нашей модели, в которой выпадение, начавшись, продолжается неизменным в течение дневных часов между 1200 и 1800 UT.

Неучет эффектов химии ионов может также привести к значительной недооценке уменьшения O_3 в начальной фазе выпадения частиц. Стратосфера, однако, восстанавливается быстро от воздействий химии ионов. Таким образом, за период в 24 ч (время, за которое интенсивность выпадения уменьшается в 10 раз) недооценка уменьшения озона, вызванная неучетом химии ионов, составит только 11,5, 8,7 и 30% для высот 44, 50 и 60 км по сравнению с 15, 40 и 73% через 6 ч после действия выпадения с максимальной интенсивностью. Через три дня недоучет эффектов химии ионов не имеет существенного значения.

Таблица 1

**Возрастание концентрации N_2O
под влиянием выпадающих частиц**

Высота, км	Относительная концентрация N_2O	Концентрация N_2O в ($см^{-3}$) после события выпадения частиц		
		через 6 ч	через 24 ч	через 72 ч
40	9,0 (9) *	9,2 (9)	9,3 (9)	9,3 (9)
44	3,7 (9)	3,9 (9)	4,0 (9)	4,0 (9)
48	1,6 (9)	1,8 (9)	1,9 (9)	1,9 (9)
52	7,2 (8)	8,8 (8)	9,8 (8)	9,8 (8)
56	3,4 (8)	4,7 (8)	5,5 (8)	5,5 (8)
60	1,7 (8)	2,7 (8)	3,3 (8)	3,3 (8)
64	8,5 (7)	1,6 (8)	2,1 (8)	2,1 (8)
68	4,4 (7)	1,0 (8)	2,4 (8)	1,4 (8)

*) $A (\pm B) \equiv A \times 10 \pm B$.

Таблица 2

Результаты сравнения расчетной концентрации HNO_3 с учетом (а) вклада химии отрицательных ионов и (б) без учета вкладов отрицательных ионов

Высота, км	6 ч		24 ч	
	а	б	а	б
44	4,51 (6) *	9,1 (8)	6,8 (6)	2,7 (7)
50	1,0 (5)	2,15 (8)	3,2 (5)	3,0 (7)
60	1,4 (3)	4,0 (7)	5,6 (4)	5,1 (6)

*) $A (\pm B) \equiv A \times 10 \pm B$.

Ясно, что химия должна приниматься во внимание надлежащим образом при описании быстрых откликов стратосферы на солнечно-протонные события. Поскольку стратосфера откликается на воздействие большой вспышки с характерным временем 24 ч, то химия ионов может иметь отношение к проблеме солнце—погода—климат. По этой причине автором данной работы проводятся исследования по учету более совершенных моделей химии отрицательных ионов. Сегодня, кроме того, представляется целесообразным подвергнуть лабораторной проверке

наши предположения относительно образования N_2O из молекулы $N_2(A^3\Sigma)$, а также образование HNO_3 и HO_x посредством химии отрицательных ионов, несмотря на то что эти предположения основывались на достоверных лабораторных данных.

Эта работа представляет результаты одной из частей научных исследований, выполненных в лаборатории струйных течений Калифорнийского технологического института по контракту 7-100 и по заданию отдела НАСА.

Литература

1. Markson R. *Nature*, **273**, 103, 1978.
2. Herman J. R., Goldberg R. J. *Atmos. Terr. Phys.*, **40**, 121, 1978.
3. Roberts W. O., Olson R. H. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **11**, 731, 1973.
4. Dickinson R. E. *Bull. Am. Met. Soc.*, **56**, 1240, 1975.
5. Bandeen W. R., Maran S. P., (Ed). Possible Relationships between Solar Activity and Meteorological Phenomena, NASA SP-366, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C. USA.
6. Chamberlain J. J. *Atmos. Sci.*, **34**, 737, 1977.
7. Reid G. R., Isaksen I. S. A., Holzer R. E., Crutzen P. J. *Nature*, **259**, 177, 1976.
8. Bates J. R. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **103**, 397, 1977.
9. Malcombe-Lewis D. J. *Nature*, **247**, 540, 1974.
10. Drejer J. W., Perner D., Roy C. R. *J. Chem. Phys.*, **61**, 3164, 1973.
11. Swider W., Kaneshea T. K. *Planet. Space Sci.*, **21**, 1969, 1973.
12. Bennett R. A., Huestis D. L., Moselev J. T., Mukherjee J., Olson R. E., Benson S. W., Peterson J. R., Smith R. T. AFCRL-TR-74-0417, Air Force Cambridge Research Laboratory, Hanscom, MA, 1974.
13. Huestis D. L., Moseley J. T., Mukherjee D., Peterson J. R., Smith R. T., Zeman H. D. AFCRL-TR-75-0606, Air Force Cambridge Laboratory, Hanscom, MA, 1975.
14. Fehsenfeld F. C. Private communication.
15. Smith F. T. Private communicated cited by D. S. Smith, Church M. J., Miller T. M., *J. Chem. Phys.*, **68**, 1224, 1978.
16. Turco R. P., Whitten R. C. NASA-TP-1002, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C., 1977.
17. Reagan J. B. Ionization Processes in Dynamical and Chemical Coupling. Ed. by B. Grandal and J. A. Holtet, D. Reidel Publishing Company, Cor-drecht, Holland.
18. Utwick J. C. Effective Recombination Coefficients and Lumped Parameters in the D Region During Solar Particle Events in Proceedings of COSPAR Symposium on Solar Particle Events of Nov. 1969, AFCRL Report 72-0474, Air Force Cambridge Res. Lab. Hanscom, MA, 1972.
19. Heath D. F., Krueger A. J., Crutzen P. J. *Science*, **197**, 866, 1977.
20. Boruki W. J., Colburn D. S., Whitten R. C., Capone L. A., Covaert M. EOS, *Trans. Am. Geophys. Union*, **59**, 284, 1978.
21. Zerefos C. S. *Planet. Space Sci.*, **23**, 1035, 1975.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЛИННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЯДОВ

К. Г. Макленнен, Л. Дж. Ланцеротти

Совместные исследования периодичности климатических данных и данных по солнечно-земным явлениям — хорошо известный способ изучения возможного влияния Солнца на погоду и отыскания его механизмов. Процедура динамического спектрального анализа, примененная к достаточно длинным участкам ряда данных, может привести к выявлению короткопериодных спектральных составляющих, которые «стираются» при анализе всего ряда данных в целом. Мы провели такой анализ, используя алгоритм «быстрого преобразования Фурье» и «окно Томсона», а в качестве исходных данных брались месячные температуры в большом интервале времени (примерно за 200 лет), полученные на трех станциях в Балтиморе, Филадельфии, Нью-Хейвене (США) и на станции в центре Англии. Мы обнаружили, что иногда в спектре наблюдается значительное увеличение мощности составляющих с периодом около 11 лет. Данные для Англии меньше, чем другие, свидетельствуют о каких-либо 11-летних вариациях. Отчетливые составляющие с периодом около 2 лет (квазидвухлетняя периодичность) в температуре были обнаружены в Балтиморе и Филадельфии в период приблизительно между 1871 и 1891 гг., а в Нью-Хейвене эта зависимость была менее выражена. В Англии никаких заметных усилений в этот период времени обнаружено не было. Результаты этого динамического спектрального анализа демонстрируют эффективность метода для изучения региональных климатических условий и их связей с солнечными явлениями.

1. ВВЕДЕНИЕ

В ряде исследований, проведенных на основе анализа временных рядов, показано, что в долгопериодических колебаниях температуры не обнаружено каких-либо периодов, связанных с солнечным циклом [1—3]. Однако в этом вопросе нет единодушия [4, 5]. Отсутствует достаточное количество надежных рядов климатических данных с продолжительными интервалами, пригодными для изучения их периодичности. Такие долгопериодные наблюдения известны главным образом как исторические случайности, и поэтому неясно, могут ли они адекватно представлять климатические явления в большом географическом регионе. В этой работе мы сравниваем периодичности, выделенные в дан-

ных по температуре из четырех районов с перекрывающимися временными интервалами. Для проверки существования короткопериодных составляющих в этих данных мы будем использовать процедуру динамического спектрального анализа. Мы показали, что имеются существенные различия в температурных флуктуациях между данными, полученными для восточной части Северной Америки и центральной Англии. Более того, мы показали, что данные различаются даже на двух станциях в Северной Америке, разделенных расстоянием 200—300 км.

Мы провели спектральный анализ и численный динамический анализ энергетического спектра временных рядов температуры для трех пунктов Северной Америки. С этой целью мы использовали осредненные за месяц данные для Балтимора ($39^{\circ} 18'$ с. ш., $76^{\circ} 38'$ з. д., 1817—1977 гг.), Филадельфии ($40^{\circ} 0'$ с. ш., $75^{\circ} 10'$ з. д., 1790—1977 гг.) и Нью-Хейвена ($41^{\circ} 18'$ с. ш., $72^{\circ} 55'$ з. д., 1781—1977 гг.), которые были получены через Национальный климатический центр в Ашвилле. Были проведены также анализы среднемесячных температур из центральной Англии (1659—1973 гг.), собранных Мэнлеем [6]. Об анализе энергетических спектров этих данных по методу максимума энтропии сообщает Мейсон [1]. Для сравнения североамериканских данных с английскими последние были переведены из шкалы Цельсия в шкалу Фаренгейта. Аналогичная процедура спектрального анализа использовалась нами ранее в геомагнитных исследованиях. После предварительного применения метода «окна Томсона» во временной области [10] был проведен анализ по быстрому преобразованию Фурье. Динамические спектры рассчитывались таким же образом, но для выборок данных, состоящих из 256 или 1024 точек, и со сдвигом в два года после каждого расчета.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены энергетические спектры для английских данных по четырем последовательным временным интервалам за период 1659—1959 гг. На всех спектрах наблюдаются четкие годовые и шестимесячные пики. (Отклонение, равное 2σ в каждой точке спектра, эквивалентно изменению величины в каждой точке в 3 раза.) Отчетливый двухлетний пик виден для ряда данных за период 82 года (1739—1819 гг.), пик примерно в 1,6 года наблюдается в 60-летней выборке данных 1899—1959 гг. В области 10—12 лет никакого существенного пика не обнаруживается ни в одном из спектров рис. 1 и в спектре всей 300-летней выборки, не показанной здесь. Это обстоятельство находится в согласии с результатами Мейсона [1].

Для четырех временных интервалов, изображенных на рис. 1, спектр существенно изменяется при переходе от одного интервала к другому. Таким образом, можно сказать, что полный

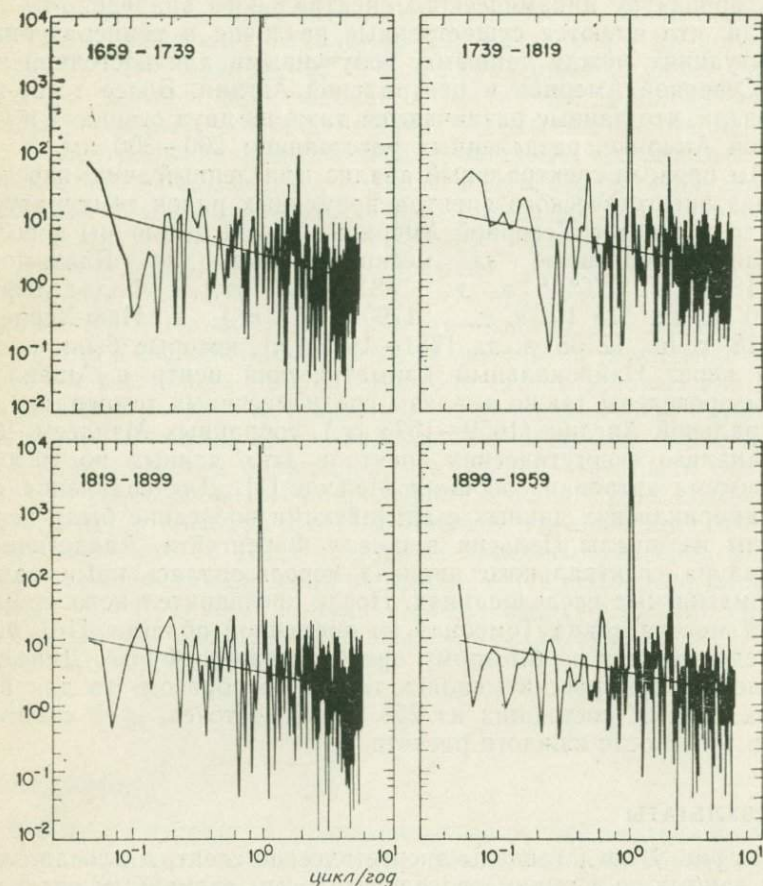


Рис. 1. Энергетические спектры месячных температур в центральной Англии для четырех интервалов времени с 1659 по 1959 г.

спектр всех четырех серий, относящихся к локальным климатическим условиям, не содержит короткопериодных составляющих. В левой части рис. 2 показан динамический спектр данных по центральной Англии в частотном интервале от 0,25 до 2,5 цикл/год за период времени с 1671 по 1961 г. Ясно видны как годовые, так и шестимесячные вариации. Последние прослеживаются на протяжении 300 лет, при этом они существенно уменьшаются между 1821 и 1851 г. Не видно строго непрерыв-

ного хода двухлетней составляющей. В спектре данных по всей центральной Англии, описанных Мейсоном [1], двухлетняя составляющая проявлялась, но амплитуда ее не была самой боль-

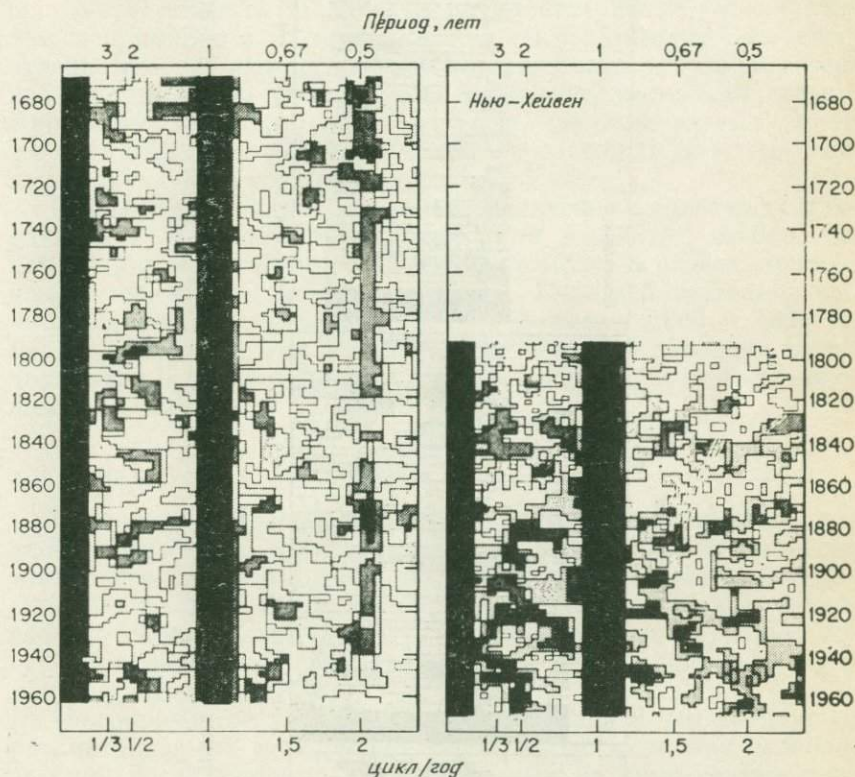


Рис. 2. Динамические спектры для данных по центральной Англии и Нью-Хейвену для диапазона периодов от 0,25 до 4 лет. Два последовательных уровня интенсивности различаются примерно на 10 дБ. Заметно увеличение амплитуды годовых и шестимесячных составляющих для центральной Англии, но отсутствует подобное увеличение составляющих с шестимесячным периодом в данных по Нью-Хейвену.

шой. В правой части рис. 2 показан соответствующий спектр для данных станции Нью-Хейвен, начинающийся с 1790 г. Нетрудно заметить, что шестимесячная периодичность полностью отсутствует, тогда как двухлетняя кое-где проявляется сильнее.

На рис. 3 представлены динамические спектры температурных данных за период с 1820 по 1940 г. для трех североамериканских станций. Наиболее интересной особенностью этих спектров является усиление двухлетней составляющей, наблюдав-

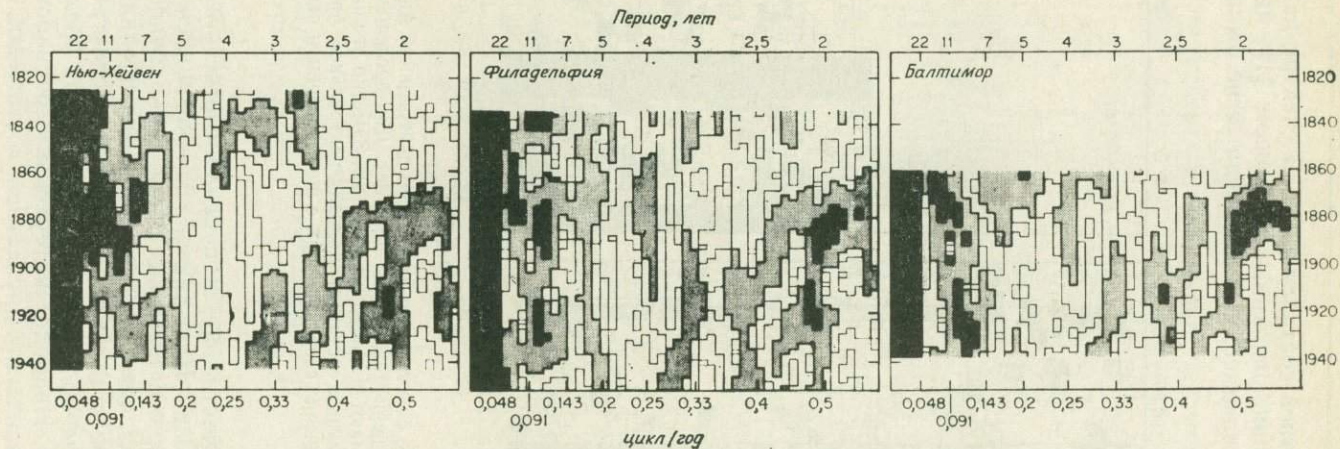


Рис. 3. Динамические спектры температурных данных для трех северо-американских станций за период с 1781 по 1977 г.

шейся в период с 1870 по 1900 г. Это усиление наиболее отчетливо проявляется на самой южной из рассматриваемых станций, в Балтиморе, где оно и началось раньше. В Филадельфии рост двухлетней составляющей начинается позже, а заканчивается примерно в то же время, что и в Балтиморе. Соответствующее возрастание двухлетней составляющей на самой северной станции (Нью-Хейвен) было выражено не столь отчетливо. Динамические спектры температурных данных, взятых за то же время для центральной Англии, не содержат заметных усилений двухлетней составляющей.

Наблюдается также некоторое увеличение амплитуд составляющих с 11- и 22-летними периодами в спектре, изображенном на рис. 3. Эти возрастания имеют место в разные временные интервалы. Например, усиление 15-летней составляющей наблюдалось в Нью-Хейвене в период между 1860 и 1890 гг. В это же время отмечалось усиление 10-летней вариации в Филадельфии, и не усиление, а скорее уменьшение этой составляющей в Балтиморе.

3. ВЫВОДЫ

Основным выводом, сделанным в результате анализов, является существование короткопериодических вариаций в записях температур на разных станциях. Изменчивость может быть различной в местах, отдаленных друг от друга всего лишь на несколько сотен километров. Эти короткоживущие вариации могут быть «стерты», когда спектр получают по длинному временному ряду данных.

Полученные результаты показывают также, что по данным рассматриваемых станций нет явного сходства между периодическими составляющими, наблюдаемыми на двух континентах. В частности, составляющая с периодом около шести месяцев, отчетливо наблюдаемая в данных по центральной Англии, не обнаруживается на восточном побережье Северной Америки почти во всем трехсотлетнем интервале.

Составляющую с периодом около двух лет, наблюдаемую иногда в температурных спектрах, можно назвать квазидвухлетней периодичностью (например, [11, 12, 1]). Полученные спектральные характеристики ясно показывают, что составляющие с двухлетним периодом появляются спорадически и могут временами иметь большую амплитуду на одной станции (например, в Балтиморе), но при этом почти полностью отсутствовать на другой, находящейся на расстоянии нескольких сотен километров (Нью-Хейвен, см. рис. 3). Ландсберг и Кейлор [12] показали, что квазидвухлетняя периодичность проявляется отчетливее, если при спектральном анализе используются только

зимние данные. Результаты нашего динамического анализа показывают, что в квазидвухлетней составляющей существуют определенные временные и пространственные изменения; эти изменения должны быть учтены в разрабатываемых теоретических моделях.

Сугиура и Порос [13] отметили временную изменчивость в квазидвухлетней вариации геомагнитной активности. Однако из представленных здесь данных не вытекает связи двухлетней периодичности с глобальными климатическими явлениями.

Мы благодарны Г. Н. Грегори за полезные обсуждения этих материалов и указания на шестимесячную периодичность в данных по Англии, которую он получил методом наложенных эпох. Мы также благодарим Р. Квейли и Х. Диаса из НОАА Национального климатического центра в Ашвилле (шт. Северная Каролина) за предоставление данных по Северной Америке.

Литература

1. *Mason B. J.* Quart. J. R. Met. Soc., **102**, 473, 1976.
2. *Monin A. S., Vulis I. L.*, Tellus, **23**, 337, 1971.
3. *Mock S. J., Hibler W. D.*, III, Nature, **261**, 484, 1976.
4. *Currie R. G. J.* Geophys. Res., **36**, 5657, 1974.
5. *King J. W.* Astronaut. Aeronaut., **13** (4), 10, 1975.
6. *Manley G.* Quart. J. R. Met. Soc., **100**, 389, 1974.
7. *Lanzerotti L. J., Robbins M. F. J.* Geophys. Res., **78**, 3816, 1973.
8. *Fukunishi H., Lanzerotti L. J. J.* Geophys. Res., **79**, 142, 1974.
9. *MacLennan C. G., Lanzerotti L. J., Fukunishi H.* Spatial and temporal variations of ULF disturbances. In Magnetospheric Physics (ed. by B. M. McCormac), Reidel D., Dordrecht-Holland, 1974.
10. *Thomson D. J., Robbins M. F., MacLennan C. G., Lanzerotti L. J.* Phys. Earth, Planet. Int., **12**, 217, 1976.
11. *Landsberg H. E.* Beiträge zur Physik der Atmosphäre, **35**, 184, 1962.
12. *Landsberg H. E., Kaylor R. E. J.* Interdisciplinary Cycle Res., **7**, 237, 1976.
13. *Sugiura M., Poros D. J. J.* Geophys. Res., **82**, 5621 1977.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СООБЩЕНИЕ ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ ВЫСОТЫ ТРОПОПАУЗЫ В СВЯЗИ С ВАРИАЦИЯМИ В СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Дж. П. Базарт, Д. Н. Яргер

Выполнено исследование, связывающее изменения в высоте тропопаузы с пересечениями секторной границы магнитного поля. Анализы методом наложенных эпох не выявили четкой взаимосвязи между этими параметрами. Моделирование флуктуаций с использованием затухающих колебаний, возникающих при пересечениях указанных границ, дает картину изменений во времени, хорошо совпадающую с данными наблюдений.

В ближайшем будущем исследователи Университета штата Айова и Университета штата Висконсин проведут ряд экспериментов с использованием рассеивающего вперед радиолокатора, чтобы исследовать корреляции между поведением тропопаузы и солнечной активностью во временных масштабах от нескольких минут до нескольких дней. Готовясь к этим экспериментам, мы изучили поведение тропопаузы по данным наблюдений на нескольких станциях в Канаде и при этом пытались найти корреляцию с солнечной активностью в масштабах времени от нескольких дней до года. Солнечной переменной, выбранной в большинстве этих исследований, было пересечение секторной границы магнитного поля.

Анализ методом наложенных эпох относительно пересечений секторных границ магнитного поля (в качестве ключевых дней) был выполнен по суточным временным рядам высот тропопаузы на станциях Алерт, Резольют, Бейкер-Лейк, Траут-Лейк и Манивоки [1] в 1968 г. и на тех же пяти станциях плюс Мусони в 1969 г. Ни один из этих анализов, выполненных во временном диапазоне ± 30 сут относительно ключевых дней, не дал в корреляционном сопоставлении результатов выше 95%-ного доверительного уровня. Анализы проводились отдельно по $+/-$ пересечениям, $-/+$ пересечениям и по сумме этих типов пересечений. Были использованы все пересечения за 1968 и 1969 гг. по данным Свалгаарда [2]. В анализ день за днем были включены изменения высоты тропопаузы для всех пяти станций с использованием результатов метода наложенных эпох.

Более подробно поведение тропопаузы исследовалось с при-

влечением первичных данных о суточных изменениях. Временные ряды суточных измерений высоты показывают, что максимум высоты тропопаузы можно отождествить с конкретным пересечением границы. Однако существует расхождение во времени между точным днем изменения высоты тропопаузы и точным днем пересечения границы. Из этого следует, что анализ методом наложенных эпох должен дать отрицательный результат ввиду «смазывания» эффекта. Кроме того, доказательством однозначного соотношения между данными о максимумах высоты тропопаузы и пересечениями границы является подобие между результатом анализа Фурье высот тропопаузы и средней величиной временного интервала между пересечениями в 1969 г. Максимальный коэффициент для ряда Фурье, отличный от среднего, составил около 14 сут для большинства станций, и средний интервал между пересечениями был равен 14 сут.

Чтобы отыскать возможную причинно-следственную связь между отдельными изменениями в высоте тропопаузы и отдельными пересечениями границы, мы построили эмпирическую модель изменений высоты тропопаузы. Атмосфера в ней рассматривается как резонансная система с затуханием, входными переменными которой являются пересечения секторной границы магнитного поля, а выходными — изменения высоты тропопаузы. Импульсный отклик этой системы представляет собой затухающую синусоидальную волну. Соответствующее математическое выражение для простейшей модели имеет вид

$$h(t) = \sum_{i=1}^N u(t - T_{di}) A e^{-\xi \omega_r (t - T_{di})} \cos [\omega_n (t - T_{di}) + \phi],$$

где t — время в днях года, T_{di} — день пересечения секторной границы магнитного поля, ω_n — собственная резонансная угловая частота, $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ — затухающая частота, ξ — скорость затухания, ϕ — фаза, A — амплитуда волны, N — число пересечений границы, $u(t)$ — единичная ступенчатая функция, $h(t)$ — изменения высоты тропопаузы.

Если пересечение границы магнитного сектора действительно приводит к изменению высоты тропопаузы, эквивалентная входная функция рассматриваемой атмосферной системы может иметь любую произвольную форму волны. В этом случае в модель должны быть введены гармонические функции с основной частотой ω_n . Однако во многих случаях даже простая синусоидальная волна оказывалась достаточной, чтобы подогнать модель к данным наблюдений. Это указывает на то, что многократное пересечение границы можно рассматривать в качестве побудительной причины. Действие модели тогда проявляется в том, что каждое пересечение границы дает начало новой ко-

синусоидальной волне. Каждая новая волна накладывается на несколько вызванных ранее волн и затухает в соответствии со скоростью затухания. Различные эффективные амплитуды и периоды можно смоделировать путем суперпозиции. Если изменения высоты тропопаузы не приходятся на день пересечения границы, то параметр T_{di} можно увеличить, чтобы получить опережение или задержку вызванной волны.

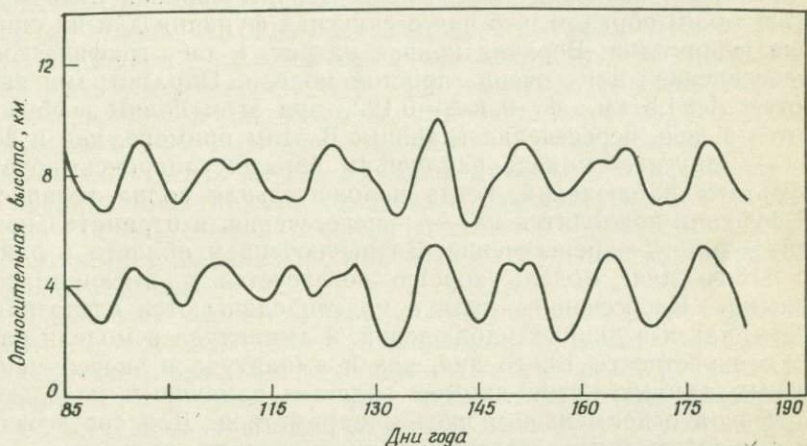


Рис. 1. Нижняя кривая — изменения высоты тропопаузы над Манивоки в 1969 г. Верхняя кривая — модель, учитывающая возбуждение затухающей косинусоидальной волны при каждом пересечении секторной границы магнитного поля.

Данные, полученные на канадских станциях, характеризуются четырьмя основными типами колебаний: 1) вариации синусоидального типа, 2) одиночный узкий пик, 3) двойной или тройной пик и 4) широкий максимум, который может иметь протяженность до 20 сут. Ясно, что 1-й тип наилучшим образом удовлетворяет основной модели.

Колебания 3-го типа часто содержат пики, разделенные по времени гармоническими составляющими колебаний 1-го типа, поэтому необходимо моделирование генерации гармоник. 4-й тип предполагает наличие более длинной волны (чем в 1-м типе) и часто может быть субгармоникой волн 1-го типа. Одиночный узкий пик (2-й пик), который точно не отделен по времени от синусоидального изменения, может оказаться трудным для моделирования. Моделирование колебаний всех четырех типов было предпринято с использованием наименьшего возможного количества параметров. Мы здесь рассмотрим пример успешного моделирования колебаний 1-го типа.

Нижняя кривая на рис. 1 представляет собой 100-дневный отрезок данных о высоте тропопаузы над Манивоки в 1969 г. Данные были обработаны с целью удаления годовых трендов путем исключения средней величины и синусных и косинусных компонент Фурье с периодом 365 дней. Результаты были сглажены дважды с помощью трехточечного скользящего среднего. Вариации высоты тропопаузы следуют синусоидальному закону, но временной интервал между пересечениями кривой нуля меняется таким образом, что чисто синусная функция для их описания непригодна. Верхняя кривая на рис. 1 дает графическое представление для очень простой модели. Параметрами являются $A=1,5$ км, $\phi=0$ и $\xi=0,122$, при этом волны возбуждаются в день пересечения границы. В этом примере, как и во многих других, модель наилучшим образом аппроксимирует результаты наблюдений, когда положительная волна косинусной функции приходится на $-/+$ пересечения, а отрицательная волна — на $+/-$ пересечения. За исключением области в районе 118-го дня, модель хорошо согласуется с имеющимися данными. Пересечения нуля в модели сдвигаются влево или вправо, как и в данных наблюдений, и амплитуда в модели растет в окрестности 139-го дня, как и амплитуда в экспериментальных данных. Этот пример является наилучшей моделью, полученной с наименьшим числом параметров. Для согласования с моделью других массивов данных вводятся временные задержки, фазовые сдвиги и гармоники.

Модель, которая зависит от пересечений границ магнитного сектора, должна быть достаточно гибкой, чтобы ее можно было использовать более чем на одной метеорологической станции. Сравнения между данными, полученными в Манивоки, Мусони и Траут-Лейк, показывают, что наиболее заметные характерные особенности одного набора данных выявляются и по другим наборам данных, но с другой амплитудой и, возможно, фазовым сдвигом. Кривая, объединяющая данные трех указанных станций, была использована, чтобы определить, какие характерные особенности моделируются, а какие являются статистическими флуктуациями. Характерные особенности, общие для всех наборов данных, четко выделялись на фоне статистических вариаций, амплитуда которых уменьшилась при осреднении. Данные по Манивоки, Мусони и Траут-Лейк были наиболее пригодны для моделирования, так как в этих пунктах наблюдаются большие флуктуации высоты тропопаузы. Меньшие флуктуации в данных на высокоширотных станциях (Бейкер-Лейк, Резольют и Алерт) было труднее разделить на компоненты, характерные для всей картины в целом, и статистические вариации. Интересная особенность модели состоит в том, что она может воспроизводить большие и малые амплитуды как функцию

времени в соответствии с тем, возбуждаются ли предполагаемые волны в фазе или противофазе при изменении временного интервала между пересечениями границы.

Другая часть данных свидетельствует в пользу определенной связи между пересечениями границы и флуктуациями высоты тропопаузы. Различия во времени между близкими максимумами на кривых по модели и по данным наблюдений были нанесены на график в зависимости от дней года. Модель была той же самой, что показана на рис. 1. График выявил сезонную вариацию с изменением от положительной до отрицательной разности в течение года. Соотношение, описывающее это изменение в функции времени, было введено в модель. Общее согласие между моделью и данными улучшилось, но ни один отдельный отрезок не дал согласия, лучшего чем на рис. 1.

Таким образом, сезонный тренд усиливает гипотезу о связи между пересечениями границы и высотой тропопаузы, хотя и не объясняет все расхождения между моделью и экспериментальными данными.

Различные сопоставления между пересечениями секторных границ магнитного поля и изменениями в высоте тропопаузы, как и моделирование соотношений между ними, не дали убедительного свидетельства того, что именно явления, связанные с пересечением границ, вызывают колебания высоты тропопаузы. Тем не менее они показали, что модель может воспроизводить многие из характерных черт ее поведения.

Мы благодарим К. Стефани и Э. Холла за помощь в анализе данных. Дж. Базарт благодарит Инженерный исследовательский институт Университета штата Айова за поддержку при выполнении этой программы работ.

Литература

1. Monthly Bulletin, Canadian Upper Air Data, Department of Transport, Meteorological Section, Toronto, Canada, 1968, 1969.
2. Solar-Terrestrial Physics and Meteorology: A Working Document, issued by Special Committee for Solar-Terrestrial Physics, c/o National Academy of Sciences, 1975.

СТРАТОСФЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ СОЛНЕЧНОГО И АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА КЛИМАТ

К. Я. Кондратьев, Г. А. Никольский

Анализ результатов аэростатного зондирования в 1962—1970 гг. и расчеты ослабления коротковолнового солнечного излучения позволили установить причины аномального ослабления полного потока прямой солнечной радиации в средней и верхней стратосфере в 1962—1966 гг. и в зимние периоды 1967—1969 и 1970—1971 гг. Было обнаружено, что влияние серии ядерных испытаний 1961—1962 гг. привело к значительному увеличению концентраций NO_x в стратосфере в высоких и умеренных широтах северного полушария, что увеличило поглощение солнечного излучения на высотах более 30 км. Поскольку уменьшение в ослаблении S сопровождается глобальным увеличением содержания озона, то NO_2 следует считать одним из главных климатообразующих факторов в стратосфере и в конечном итоге в тропосфере.

1. АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СТРАТОСФЕРУ В 1961—1968 ГГ.

Детальный анализ данных аэростатного зондирования, полученных сотрудниками Ленинградского университета в течение 1961—1970 гг., подтвердил предположение о том, что аномальное ослабление прямой солнечной радиации (ПСР) на высотах, превышающих 26 км, было вызвано присутствием в верхней стратосфере продуктов ядерных взрывов [1]. Была найдена корреляция между датами ядерных испытаний и периодами ослабления ПСР в слоях выше 30 км. Интегральный поток ПСР в некоторых случаях был меньше внеатмосферного значения (S_0) на 6—8 %. Кроме того, было отмечено [1], что в верхней атмосфере в течение 1968—1970 гг. наблюдался систематический рост ослабления потока ПСР, который в 1971 г. достиг около 1,5 %. Мы относим этот эффект к влиянию атмосферного аэрозоля.

В последние годы появился ряд статей, в которых приводились расчеты количеств NO_x , образующихся при взрывах водо-

К. Я. Кондратьев. Отдел радиационных исследований, Главная геофизическая обсерватория, Ленинград, СССР.

Г. А. Никольский. Отдел атмосферной физики, Институт физики Ленинградского университета, Ленинград, СССР.

родных бомб различной мощности. Независимо от этого было установлено, что при мощностях, превышающих 1 мегатонну (Мт) тринитротолуола (ТНТ), продукты взрывов, произведенных вблизи поверхности земли, инжектируются непосредственно в стратосферу. При мощностях взрывов в диапазоне от 30 до 50 Мт огненный шар стабилизируется на высотах от 30 до 40 км [2]. Согласно приблизительным оценкам, число молекул NO_x в среднем составляет 10^{32} на 1 Мт. Расчет по максимуму дает $1,5 \cdot 10^{32}$ молекул NO_x . Хэмпсон [3] считает, что при взрывах в верхней атмосфере число образующихся молекул NO_2 может оказаться на два порядка больше. Согласно имеющимся данным [4], суммарная мощность взрывов, проведенных в период 1961—1962 гг., составила около 340 Мт. В результате около $5 \cdot 10^{34}$ молекул NO_x было инжектировано в верхнюю стратосферу на высоту 20—25 км.

Наши расчеты показали, что концентрация NO_2 в вертикальном столбе единичного поперечного сечения, пересекающем полуглобальное кольцеобразное облако, образующееся после ядерных взрывов в умеренных и высоких широтах северного полушария, должна составить $1,6 \cdot 10^{17}$ молекул/см², что должно вызвать дополнительное ослабление интегрального потока ПСР на 2,6 %. Данные об упомянутой выше серии ядерных испытаний приводят к содержанию NO_2 около $3,5 \cdot 10^{16}$ молекул/см². Если мы примем во внимание тот факт, что подобные испытания были проведены и в предыдущие годы (1954—1958 гг.), а также повышенную эффективность взрывов в стратосфере (с точки зрения образования NO_x) в сравнении со взрывами вблизи земной поверхности, то различия между приведенными выше оценками сводятся к минимуму.

Реалистический характер оценок содержания молекул NO_2 в вертикальном столбе атмосферы в районе 50° с. ш. во второй половине 1962 г. подтвердили одновременно полученные данные измерений потоков ПСР в диапазоне длин волн от 305 до 370 нм. Так, во время подъема 7 июля 1962 г. (подъем № 9 на рис. 1) было найдено, что число молекул NO_2 в слое выше 26 км составило $3,4 \cdot 10^{17}$ см⁻². Следовательно, можно с уверенностью заключить, что эффекты ядерных взрывов 1961—1962 гг., которые привели к существенному ослаблению ПСР (2,6 % и более), имеют глобальный масштаб и значительную продолжительность (1962—1968 гг.).

На рис. 1 показана скорость уменьшения дополнительного ослабления ПСР в верхней стратосфере умеренных широт, которая составляла 0,4 % ежегодно (вплоть до 1968 г.). Продолжительный дефицит солнечной радиации в тропосфере и на земной поверхности в умеренных и высоких широтах северного полушария в 1962—1963 гг. повлиял на синоптические процессы

и погоду [5]. Такое антропогенное воздействие привело к нарушению условий нормальной циркуляции в стратосфере и тропосфере, т. е. к возмущениям климата.

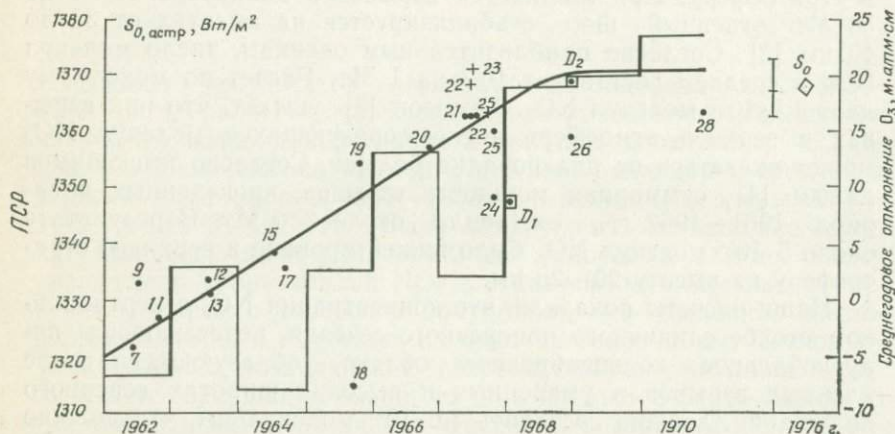


Рис. 1. Хронологические изменения потока прямой солнечной радиации, измеренного на высотах около 30 км и экстраполированного за пределы внешней границы атмосферы с учетом ослабляющих свойств ее верхнего слоя, характерных для периода очищения стратосферы (1967—1968 гг.). Числа около точек соответствуют номерам подъемов аэростатов. D_1 и D_2 — подъемы, выполненные Денверским университетом (данные Меркрея); точки — данные, экстраполированные по модели; крестики — экстраполяция, основанная на реальном состоянии стратосферы; ромбик — значение S_0 согласно измерениям на ракете «Аэробии». Ломаной линией показаны отклонения среднегодовых глобальных значений общего содержания озона от среднего значения за длительный период. Жирные вертикальные прямые отмечают даты наиболее сильных неожиданных потеплений стратосферы.

Уменьшение поглощения ПСР во времени должно наблюдаться не только благодаря естественному стоку NO_2 в тропосферу северного полушария, но и (на основе данных о распространении продуктов ядерных взрывов из высоких широт северного полушария к экватору и затем в южное полушарие [4]) в связи с переносом NO_2 в верхней стратосфере в южное полушарие, где в период с 1963 по 1966 г. наблюдалось значительное аномальное ослабление ПСР. Сравнение экспериментальных данных и расчетов позволило установить наложение эффектов от ядерных взрывов и вулканической активности в южном полушарии. Ракетные спектральные измерения ($\lambda = 3800 \text{ \AA}$) на высотах от 20 до 40 км в Вумере (30° ю. ш., 1965 г.) выявили наличие ослабляющей компоненты, имеющей на высоте 28 км оптическую толщину, равную одному рэлею, а на высоте

22 км — уже в 2,5 раза большую [6]. Такое ослабление не может быть полностью отнесено к влиянию аэрозольной составляющей. Оценка поглощения ПСР для длины волны $\lambda = 3800 \text{ \AA}$, которая соответствует максимуму в спектре поглощения NO_2 , показала, что в столбе атмосферы выше 22 км должно содержаться $7 \cdot 10^{16}$ молекул/см² NO_2 . Такое добавочное количество NO_2 уверенно обеспечит поглощение, равное 1% S_0 , в вертикальном столбе атмосферы на высотах более 22 км.

2. СОЛНЕЧНАЯ ПОСТОЯННАЯ И ЕЕ ВАРИАЦИИ

На рис. 1 представлены данные о потоках ПСР, измеренных на высотах от 26 до 33 км и экстраполированных за пределы атмосферы на основе модельных представлений о свойствах ослабления в ее верхних слоях. Для сравнения приведены данные ракетных измерений солнечной постоянной в 1976 г. [8]. Ракетные измерения S_0 были проведены с помощью четырех абсолютных полостных радиометров различной конструкции. Значение, осредненное по записям трех хорошо согласованных радиометров, составило $1367 \pm 6 \text{ Вт/м}^2$. Согласно данным автоматических межпланетных станций «Маринер-6» и «Маринер-7» и спутника «Нимбус-6», вариации величины S_0 не превышают 0,15%. Отметим здесь, что в связи с открытием колец у планеты Уран сильный аргумент в защиту изменчивости S_0 — изменяющаяся яркость планет, — по-видимому, становится излишним.

Переход от данных наших аэростатных измерений [7] к величине за внешней границей атмосферы был сделан в согласии с модельными представлениями о прозрачности верхних слоев стратосферы в 1968 г. Поэтому все модельно-экстраполированные данные несут следы изменчивости в прозрачности верхней стратосферы по сравнению с условиями 1968 г. Их следует рассматривать как данные о «метеорологической солнечной постоянной» ($S_{0,м}$) и сопоставлять с абсолютным значением астрономической солнечной постоянной $S_{0,астр} = 1371 \text{ Вт/м}^2$, найденным из аэростатных данных 1967—1968 гг. и не испытывающим какой-либо заметной изменчивости в зависимости от солнечной активности. Однако «метеорологическая солнечная постоянная» характеризуется такой зависимостью, которая в целом совпадает с предполагавшейся ранее для $S_{0,астр}$ [1]. Представление о потоке $S_{0,м}$ (который, согласно сказанному выше, должен характеризовать значение потока $S_{0,астр}$, прошедшего через слой озона), как о потоке ПСР на уровне тропопазузы, должно быть сформулировано точнее. Целесообразно считать, что величина $S_{0,м}$ характеризует влияние дополнительного содержания в стратосфере NO_x (выше 26 км) на $S_{0,астр}$.

3. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА СТРАТОСФЕРУ

Анализ результатов зондирования атмосферы в зимние периоды 1966—1970 гг. позволил установить тот факт, что дефицит солнечной радиации в зимние периоды (до 1,2 %) является следствием не столько антропогенного влияния, сколько солнечного, а также сезонного эффектов в поглощении ПСР. В течение этих лет солнечная активность достигла своего максимума и наблюдались частые и интенсивные вторжения высокоэнергетичных солнечных протонов, которые в значительной степени активизируют процессы ионизации и диссоциации N_2 , O_2 , O_3 и других компонент в верхней и средней стратосфере. Согласно [9], воздействие интенсивных всплесков солнечных космических лучей (СКЛ) приводит к образованию в верхней стратосфере в высоких широтах ($>60^\circ$) таких же количеств NO , которые образуются при ядерном взрыве мощностью 50 Мт или более. Вероятно также уменьшение концентрации O_3 на высоте 45 км на 25 % и увеличение концентрации NO в 2—3 раза, что приведет к росту числа молекул NO в вертикальном столбе атмосферы на $6 \cdot 10^{15}$ см⁻². Это увеличение приблизительно в 4 раза больше, чем вклад от галактических космических лучей (ГКЛ) в области тех же широт.

Важной характеристикой влияния ГКЛ является их высокая проникающая способность. Поэтому основное поглощение ГКЛ происходит на высотах от 9 до 16 км, где отмечается уменьшение концентрации водяных паров и O_3 и расположен максимум концентрации NO_2 [10]. Воздействие СКЛ и ГКЛ на состав стратосферы изменяется как во времени (различные периоды циклов солнечной активности), так и по высоте: максимум поглощения СКЛ локализуется на высотах от 30 до 40 км, где находится максимум относительной концентрации NO_2 .

Общее влияние СКЛ и ГКЛ, по-видимому, определяет зависимость $S_{0,m}$ от солнечной активности, как показано на рис. 2. Эта зависимость была получена после исключения тренда, связанного с антропогенными эффектами 1961—1967 гг. В сравнении с исходной кривой для S_0 [1], максимум несколько смещен и располагается теперь в области с меньшими значениями чисел Вольфа ($R_z = 40 \div 70$), а амплитуда вариаций не превышает 1,2 %.

Уменьшение $S_{0,m}$ в диапазоне чисел Вольфа, превышающих 100, связано с воздействием энергичных солнечных протонов на химический состав средней и верхней стратосферы, которое главным образом проявляется в увеличении NO_x на высотах 35—45 км в умеренных и особенно высоких широтах. Уменьшение $S_{0,m}$ при переходе к области малых значений R_z связано

с влиянием галактических космических лучей, интенсивность которых максимальна в период минимума солнечной активности [11]. Следует отметить, что влияние ГКЛ на «аэростатное» значение $S_{0,м}$ должно быть менее заметно, чем воздействие СКЛ, так как поглощение галактических космических лучей происходит главным образом в нижней стратосфере.

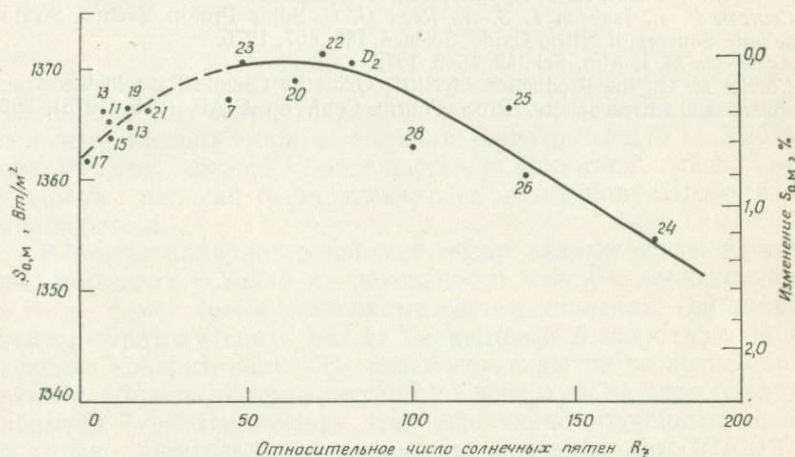


Рис. 2. Изменения «метеорологической солнечной постоянной» $S_{0,м}$ в зависимости от солнечной активности. $S_{0,м}$ отражает влияние космических лучей на поглощающую способность верхней половины стратосферы. Прерывистая часть кривой соответствует области больших погрешностей.

Таким образом, влияние солнечной активности на процессы в атмосфере проявляется в основном в изменении ее химического состава (ионизация и диссоциация N_2 и O_2 и образование NO и затем NO_2) с последующим активным подключением NO_2 к процессам преобразования солнечной радиации (область длин волн 350—550 нм) в тепло. «Модуляция» состава стратосферы и, следовательно, дивергенция потока излучения благодаря воздействию СКЛ и ГКЛ являются важным механизмом солнечно-тропосферных связей, где стратосфера играет роль контролирующего элемента.

Литература

1. Кондратьев К. В., Никольский Г. А. Изв. АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана, 6, № 3, 1970.
2. Johnston H., Birks J., Whitten G. J. Geophys. Res., 78, 27, 1973.
3. Hampson J. Surface Insolation and Climatic Potential Effect of Atmospheric Contamination. Preprint, Univ. of Western Ontario, London, Canada, 1977.

4. Ruderman M. A., Chamberlain J. W. *Planet. Space Sci.*, **23**, 247, 1975.
5. Angell J. K., Korshover J. *Monthly Weather Rev.*, **105**, 375, 1977.
6. Brewer A. W., Wilson A. W. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **92**, 267, 1966.
7. Kondratyev K. Ya., Nikolsky G. A., Murcray D. G., Kosters J. J., Gast P. R. *The Solar Constant from Data of Balloon Investigation in the USSR and the USA. Space Research XI*, Akademie Verlag, Berlin, 1971.
8. Duncan Ch. H., Harrison R. G., Hickey J. R., Kendall U. M., Sr., Thekarakara M. P., Wilson R. G. *Appl. Optics*, **16**, 2690, 1977.
9. Crutzen P. J., Isaksen I. S. A., Reed G. C. *Solar Proton Events: Stratospheric Sources of Nitric Oxide. Science*, **189**, 457, 1975.
10. Ackerman M. J. *Atm. Sci.*, **32**, 1649, 1975.
11. Nicolet M. *On the Production of Nitric Oxide by Cosmic Rays in the Mesosphere and Stratosphere. Proc. Fourth Conf. on CIAP (Feb. 1975)*, 292, 1976.

ВЫСОКОШИРОТНЫЙ АНТИЦИКЛОГЕНЕЗ И УВЕЛИЧЕНИЕ ПЕРЕНОСА СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ

Дж. Х. Ширли

Некоторые исследователи указывают на положительную корреляцию между возрастанием солнечной активности и развитием сильных антициклонов в высоких широтах ($\pm 70^\circ$). Усиление циклических вихрей наблюдается в широтной зоне $40-60^\circ$. Подобные явления были отмечены в обоих полушариях в зимние периоды.

В статье приводится краткий обзор данных о связи изменений погодных условий на поверхности земли с происходящими в то же самое время усилениями систем давления. Описывается также обратная связь между вариациями в широтном распределении концентрации CO_2 , переносом скрытой теплоты, образованием облаков и температурой на поверхности моря. Делается попытка увязать звенья этих еще плохо изученных явлений с сильно аномальными условиями в период зим 1976/1977 и 1977/1978 гг.

1. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ТРОПОСФЕРНУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ

Работы Шуурманса [1], Робертса [2], Уилкокса [3], Кинга [4], Свалгаарда [5] и других авторов показали, что значительные вариации высоты уровней атмосферного давления в течение зимы, по-видимому, связаны с солнечными явлениями, такими как прохождение секторной границы межпланетного магнитного поля, пересечение центрального меридиана Солнца активными областями и большими флоккулами, а также появлением солнечных вспышек. Эти эффекты наиболее сильно проявляются в период высокой солнечной активности. Наибольшие изменения в положении поверхностей давления чаще проявляются в определенных долготных зонах, увеличение циклонической завихренности — над северо-востоком Тихого океана и Северной Атлантикой, усиление антициклонов — над северо-восточной Сибирью, американским средним западом и т. д.

Такое увеличение градиентов давления в широтной зоне от 40 до 70° повышает степень меридионального переноса энергии, сопровождаемого атмосферной циркуляцией, усилением грозовой активности и возникновением блокирующих антициклонов. Кинг, говоря об изменении высоты поверхностей давления над Северной Атлантикой на 90 дм, характеризует его как «увеличение мощности» атмосферной системы.

Первоначальное изменение высоты поверхностей давления приводит к серии последовательных возмущений, включающих:

а) усиление фронтальной турбулентности и возрастание скорости ветра в средних широтах; это проявляется в усилении ветра вдоль поверхностей давления и активизации волнообразования, которые в свою очередь

б) увеличивают скорость переноса скрытой теплоты из высокоширотных областей поверхности океана в районы повышенной циклонической завихренности, а это

в) способствует образованию облачности и

г) может привести к росту выпадения осадков, зависящих и от других факторов; частичному изменению альbedo подстилающей поверхности, что в свою очередь может привести к уменьшению температуры воздуха у поверхности земли в средних широтах.

Таким образом, изменения амплитуды и частоты солнечных возмущений могут оказывать влияние на возникновение и интенсивность зимних штормов в зонах средних широт; например, необычное солнечное возмущение осенью 1977 г. могло вызвать ранние снегопады, сопровождаемые развитием зимних бурь. Подобная же активность в марте могла быть причиной поздней весны.

2. ПЕРЕНОС СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ И АНТРОПОГЕННАЯ ДВУОКИСЬ УГЛЕРОДА

Перенос скрытой теплоты составляет значительный процент (20 %) в полном переносе энергии в атмосфере к полюсам. Максимумы глобального испарения с океанической поверхности приходится на области субтропиков, примерно на 25° северной и южной широт; пары воды отсюда переносятся как к экватору, так и к полюсам. Области максимального испарения водяного пара соответствуют зонам антициклонических нисходящих ветвей ячеек Хедли, в которых наличие ясного неба обеспечивает максимальную инсоляцию поверхности океана.

Двуокись углерода, присутствующая в атмосфере как смесь, способствует сохранению высокой температуры поверхности путем поглощения и переизлучения инфракрасного излучения, идущего от поверхности Земли. Концентрация атмосфер-

ного CO_2 за последние 100 лет увеличилась примерно на 13 % вследствие сжигания ископаемого топлива и вырубки лесов, причем значительная часть этого увеличения приходится на последние 25 лет.

Большинство исследователей, занятых моделированием атмосферных процессов, предсказывали увеличение средней глобальной температуры в приземном слое под действием такого увеличения концентрации CO_2 , причем наиболее сильное возрастание температуры предполагалось в высоких широтах северного полушария. Однако эта тенденция не подтвердилась, так как, очевидно, другие факторы (увеличение содержания аэрозоля, возможно более высокая солнечная активность) оказали большее влияние на атмосферу.

Процессы преобразования воды в атмосфере различными моделями трактуются неодинаково. Мёллер [6] указывал, что изменения в радиационном балансе, обусловленные 10 %-ным увеличением концентрации CO_2 , могут быть полностью скомпенсированы небольшим увеличением содержания водяных паров (3 %) и облачности (1 %) без каких-либо вариаций приземной температуры. Если атмосфера действительно реагирует на возрастающее поглощение CO_2 инфракрасной радиации путем «увеличения мощности» гидрологического цикла, то следует отметить и увеличение парникового эффекта и альбедо атмосферы. Если эти разнообразные обратные связи точно уравновешены, то средняя по планете температура может остаться неизменной.

Эта простая модель оставляет неясной реальную величину времени задержки между образованием облачности и отрицательной обратной связью с температурой поверхности при максимумах субтропического испарения.

Как отмечалось выше, водяные пары, образовавшиеся в областях максимума испарения, перемещаются к умеренным зонам (где существует максимальная концентрация антропогенного аэрозоля), а также к экватору. Последующее формирование здесь облачности не уменьшает инсоляцию или испарения в областях максимума. Отрицательная обратная связь в этих зонах проявляется в форме уменьшения температуры поверхности океана, что является следствием уменьшения инсоляции в более высоких широтах. Такая обратная связь обладает временным запаздыванием, которое определяется параметрами циркуляции и значительной тепловой инерцией (запасом энергии) океанов; например, перемешивание холодных вод северной части Тихого океана с теплыми водами, переносимыми экваториальными течениями и вихрями, приводит с некоторой задержкой по времени к уменьшению температуры поверхности океана в районе течения Куро-Сиво, которое никак нельзя объяснить начальным

увеличением общего испарения. (Энергия, запасенная в океанических течениях, по ряду проявлений имеет значительно большую величину, чем энергия обычной инсоляции океанической поверхности. Эффект, сформулированный выше, возможно, имеет место при этих весьма больших потоках энергии.)

Таким образом, создается впечатление, что непрерывное увеличение концентрации CO_2 может привести к небольшому увеличению атмосферного альбедо и при ограниченной обратной связи, поскольку на самом деле система черпает энергию из огромных энергетических запасов океанов, что уменьшает влияние отрицательной обратной связи. Эти результаты наводят на мысль о том, что долговременное непрерывное увеличение концентрации CO_2 в атмосфере может в действительности привести к понижению температуры в умеренных широтах, особенно если учесть, что в атмосфере содержится также около 10^{12} кг антропогенного аэрозоля.

В течение последних 20—30 лет наблюдались следующие изменения: а) значительное понижение температуры поверхности океана в высоких широтах, б) менее значительное понижение приземной температуры в средних широтах, в) увеличение влажности в некоторых районах умеренных зон. Все эти явления согласуются с описанной выше схемой.

Однако действие описанного механизма не может в достаточной степени объяснить наблюдаемые тенденции. Существует ряд других факторов (увеличение концентрации аэрозолей, более сильные солнечные возмущения), которые могут дать значительный эффект. Мы только можем установить, что для атмосферы в целом увеличение CO_2 может вызвать усиление меридионального переноса скрытой теплоты с последующим возрастанием атмосферного альбедо, причем эти процессы могут протекать благодаря извлечению энергии, накопленной внутри океанов.

К сожалению, изменения в потоках энергии планетарного масштаба, обусловленные CO_2 , вероятно, невозможно измерить, смоделировать или рассчитать в настоящее время.

3. ВОЗМОЖНЫЙ ПАРАЛЛЕЛИЗМ В РАЗВИТИИ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ И В ЗЕМНОЙ ТРОПОСФЕРЕ

Одним из необычных возмущений следует считать последний минимум солнечных пятен в 1976 г. Во время последнего солнечного цикла (№ 21) уже произошло резкое увеличение числа солнечных пятен, которое позволяет рассматривать этот цикл как один из самых активных в нашем столетии (см., например, [7—9]). Как говорилось выше, высокая солнечная активность может привести к возрастанию градиентов давления

и развитию вихрей в области широт от 40 до 70° и, как следствие этого, к усилению зимних бурь в умеренных широтах.

Таким образом, настоящий период отличается существенно повышенным содержанием CO₂ в атмосфере даже по сравнению с уровнем CO₂ в конце 50-х годов (ближайший период высокой солнечной активности). Современное увеличение концентрации CO₂ является самым аномальным в истории.

Описанные соображения позволяют автору выдвинуть следующую гипотезу:

а) «непроверяемая» модель усиления переноса скрытого тепла за счет увеличения концентрации CO₂, описанная выше, является точным отображением энергетических потоков в системе атмосферы в планетарном масштабе;

б) аномальные условия упомянутых выше двух зим являются «нормальным» результатом воздействия совокупности указанных атмосферных процессов;

в) если возмущения в системе земной атмосферы, обусловленные необычными событиями солнечного цикла, будут дальше увеличиваться, то можно ожидать последовательность нескольких суровых зим в периоды максимума и спада последнего цикла № 21 солнечной активности, каждый из которых может вызвать резкое охлаждение в средних широтах северного полушария.

Литература

1. *Schuermans C. J. E.* This volume, 1979.
2. *Roberts W. O.* This volume, 1979.
3. *Wilcox J. M.* This volume, 1979.
4. *King J. W.* This volume, 1979.
5. *Svalgaard L.* In: *Correlated Interplanetary and Magnetospheric Observations.*, ed. Page D. E. D. Reidel Pub. Co., Boston, MA (1974).
6. *Moller F. J.* *Geophys. Res.*, 68, 13, 1963.
7. *Sargent H. H.* Paper Am. Geophys. Union, San Francisco, CA, 1977.
8. *Kane R. P.* *Nature*, 274, 139, 13, 1978.
9. *Gribbin J. R., Plagemann S.* *The Jupiter Effect*, Vintage Books, Book 76, 1974.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНО-АТМОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ С ПОМОЩЬЮ РЛС ЧАТАНИКА

Н. Дж. Ф. Чанг

Радиолокационная станция Чатаника, находящаяся вблизи Фэрбенкса (шт. Аляска), с 1971 г. использовалась для изучения ионосферы методом некогерентного рассеяния. В этой статье приводятся некоторые результаты, полученные при ионосферных измерениях. Описаны также последние тропосферные и стратосферные измерения и эксперименты по возможному взаимодействию этих слоев атмосферы и ионосферы.

1. ВВЕДЕНИЕ

РЛС Чатаника представляет собой когерентный радиолокатор со следующими типичными параметрами: рабочая частота 1290 МГц при пиковой мощности около 3—4 МВт; параболическая вогнутая антенна диаметром 27 м с шириной луча $0,6^\circ$, полностью управляемая и охватывающая полусферу, температура шумов системы около 110 К. Более подробное описание см. в статье [6].

Благодаря высокоширотному расположению РЛС измерения ионосферного электрического поля производились при вращении антенны под авроральным овалом, и в целом их можно рассматривать как измерения магнитосферных электрических полей. Эти измерения представляют интерес, поскольку магнитосферные электрические поля влияют на перераспределение и ионизацию *F*-области, управляют токовой системой электроструи и ответственны за джоулев нагрев как в ионосфере, так и в нейтральной атмосфере.

В последние два года область действия РЛС была расширена до нижней атмосферы как результат работы, проделанной Бэлсли и Фарли [1]; они установили пригодность РЛС Чатаника для измерений тропосферно-стратосферных ветров. Впоследствии методика измерений была уточнена и усовершенствована. С помощью РЛС можно получить профили скорости и направления ветра на высотах примерно от 4 до 25 км с про-

странственным разрешением 750 м и временным разрешением около 6 мин.

В настоящее время с помощью усовершенствованного радиолокатора Чатаника стало возможным проводить координированные измерения в тропосфере, стратосфере, ионосфере и магнитосфере и тем самым улучшить изучение солнечно-атмосферных связей. В следующей части мы рассмотрим один из случаев выделения энергии, связанного с джоулевым нагревом, чтобы на его примере показать виды возможных измерений притока энергии, а также скорости ветра и константы структуры турбулентности C_n^2 в тропосфере и стратосфере. Из всего этого следует, что предложенные измерения могут оказать неоценимую помощь в изучении взаимодействия между тропосферой и стратосферой, а также солнечно-атмосферных связей.

2. ВОЗМОЖНОСТИ РЛС ЧАТАНИКА

2.1. ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Во время значительных высыпаний частиц концентрация электронов на высотах 90—100 км сильно возрастает в результате ионизирующих столкновений внедряющихся авроральных электронов с компонентами атмосферы. Профили электронной концентрации, получаемые по измерениям интенсивности сигнала обратного рассеяния, позволяют найти скорость ионизации, распределение энергии высыпающихся электронов и средний приток энергии [8].

Количество энергии, выделенной при джоулевом нагреве, можно определить по частотному спектру и интенсивности сигнала обратного рассеяния. По первому моменту спектра можно определить электрическое поле, перпендикулярное магнитному полю, и вектор нейтрального ветра. Эти параметры в сочетании с данными о проводимости E -области, полученными из профиля электронной концентрации, позволяют установить величину притока энергии [9].

Высыпание частиц и джоулев нагрев создают тепло, которое влияет на динамику термосферы и определяет эффект передачи возмущения через ветры и волны, возникшие за счет перераспределения поступающей энергии. Поскольку эти ветры и волны могут возмущать и модулировать среднеширотную термосферу и, возможно, даже нижележащую атмосферу, джоулев нагрев и высыпания частиц представляют собой достойный объект для изучения причинно-следственных связей между верхней и нижней атмосферой.

На рис. 1 приведен пример проявления джоулева нагрева. С этим событием было связано заметное повышение темпера-

туры ионов в F -области и возрастание на 150 К температуры экзосферы (на рисунке не показано). Этот пример иллюстрирует величину и временную вариацию поступающей энергии; максимальный приток тепла от солнечной радиации выше 90 км

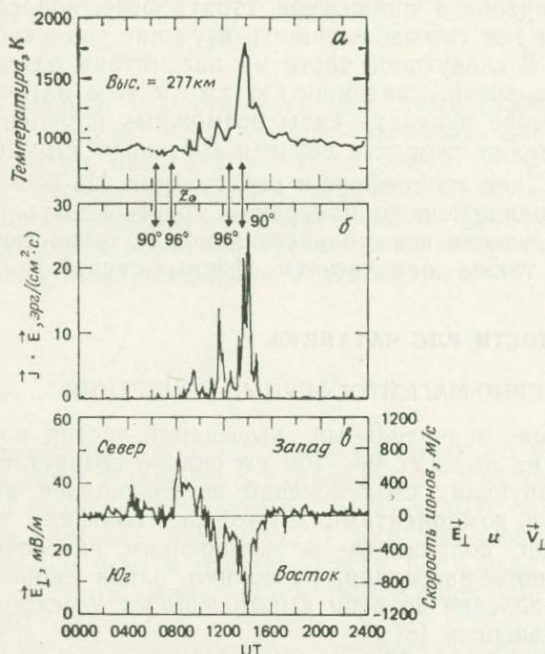


Рис. 1. Температура ионов в F -области (a), джоулев нагрев, интегрированный по высоте (b), и меридиональное электрическое поле (c) в Чатанике 13 августа 1975 г. Основное выделение тепла наблюдается в 14 00 UT сразу за местным восходом Солнца. Максимальный приток энергии был равен приблизительно 25 эрг/(см²·с). Z_{\odot} — солнечный зенитный угол [5].

на низкой широте составляет менее 5 эрг/(см²·с). После интегрирования притока энергии за время всего события мы находим, что в ионосфере над радаром была выделена энергия приблизительно $(2 \div 3 \cdot 10^5)$ эрг/см².

Высыпание частиц характеризуется энергией, сравнимой с джоулевым нагревом, пример которого приведен на рис. 1; процесс обычно продолжается в течение часа или двух. При этом обычно выделяется энергия порядка $(2 \div 3 \cdot 10^5)$ эрг/см².

2.2. ТРОПОСФЕРНО-СТРАТОСФЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Ниже ~ 60 км число свободных электронов уменьшается до такой степени, что некогерентное рассеяние от них уже не обна-

руживается. Однако на высоте ~ 30 — 35 км чувствительные радиолокаторы с большой величиной произведения апертуры на мощность [2] могут зафиксировать сигналы обратного рассеяния от нейтральной компоненты атмосферы. В отличие от некогерентного рассеяния, которое обусловлено флуктуациями плотности, вызванными тепловым движением свободных электронов, эти сигналы обратного рассеяния связаны с вариациями коэффициента преломления под действием турбулентности. Поскольку указанные нерегулярности коэффициента преломления переносятся существующим там ветром, спектры сигналов обратного рассеяния представляют собой средство для получения данных как о поле ветра, так и о степени турбулентности [1, 3, 7].

Для измерений ветра были использованы два различных метода. В первом антенна поддерживалась на постоянной высоте и вращалась с постоянной скоростью на 360° . Данные об отражениях, полученные на определенной высоте, с учетом доплеровского сдвига (первый момент спектра обратного рассеяния) наносились на диаграмму скорость—азимут (VAD). Предполагая, что ветры однородны во времени (12 мин) и в пространстве (круг диаметром 19 км на высоте 9,4 км), охватываемых радиолокатором за цикл измерений, можно считать, что доплеровский сдвиг изменяется по синусоиде с изменением азимута. Используя метод наименьших квадратов, полученные точки можно привести в соответствие с синусоидальной волной. Амплитуда, фаза и смещение синусоидальной волны указывают соответственно горизонтальную скорость, направление и вертикальную компоненту поля ветра.

Пример профиля ветра, полученного при азимутальном сканировании, приведен на рис. 2, а. На этом рисунке полученные на РЛС скорости и направления сопоставлены с радиозондовыми измерениями, проведенными в Покер-Флэт в 3 км к северу от РЛС. Отличное согласие между результатами этих двух измерений не оставляет сомнения в том, что с помощью радиолокатора можно проводить измерения ветра.

С помощью радиозонда невозможно проводить такой важный для изучения тропосферно-стратосферных связей тип измерений, как измерения вертикальных движений. На рис. 2, б приведен пример получения вертикальных скоростей методом VAD. Более непосредственно вертикальные движения можно измерить с помощью вертикально направленного радиолокатора. Измерениями этого типа, проведенными 4 апреля 1978 г., получены максимальные скорости в согласии с результатами, представленными на рис. 2, б; кроме того, они указывают на волнообразные колебания скоростей на высоте 4 км с периодами порядка нескольких минут. Такие большие значения вертикаль-

ных скоростей могут оказывать сильное воздействие на обмен энергией между различными слоями атмосферы.

Вторым методом, использованным в последнее время для получения профилей ветра, является «позиционный» метод, в ко-

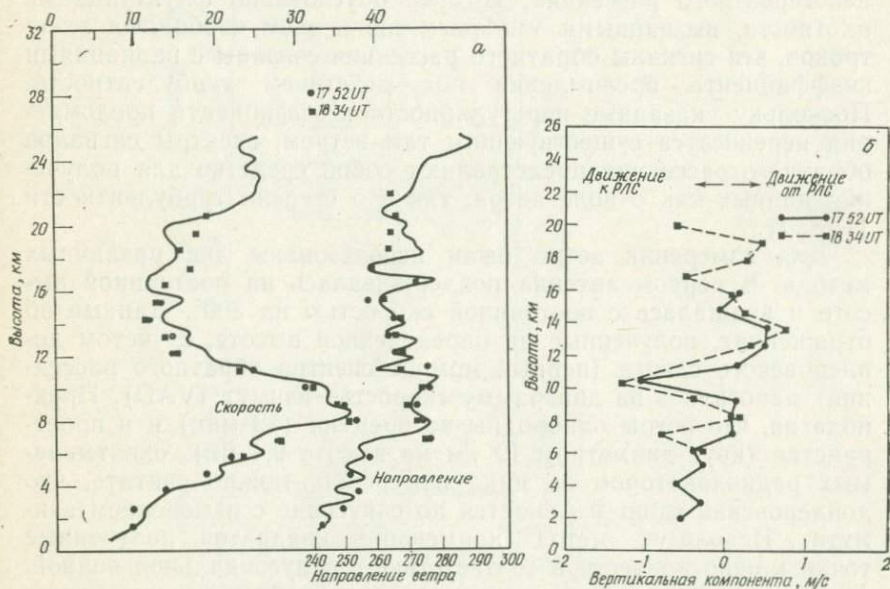


Рис. 2. а — сравнение горизонтальной скорости ветра и его направления, полученных с помощью радиолокационных измерений (точки, импульс 10 мкс) и радиозондовых измерений (кривые, 18 21 UT, время измерения по достижении 25 км примерно 85 мин); б — вертикальные движения, полученные с помощью метода VAD 23 октября 1976 г.

тором антенна занимает фиксированные положения в заранее определенной последовательности. Поскольку вектор скорости определяется в трех независимых измерениях, этот метод позволяет построить профили ветра за 6-минутный интервал или меньше. Позиционный метод дает не только лучшее время разрешения по сравнению с методом азимутального сканирования, но и больше подходит для длительных наблюдений. При измерениях в апреле 1978 г. с помощью позиционного метода производился непрерывный контроль за полем ветра в течение 48 ч. Таким образом, с радиолокатором можно осуществлять слежение за полем ветра с временным разрешением и продолжительностью измерений, которые недостижимы с другими техническими средствами.

Мощность сигнала обратного рассеяния непосредственно связана с константой коэффициента преломления C_n^2 . Этот пара-

метр обеспечивает информацию о структуре атмосферы двумя путями: 1) временные и пространственные изменения C_n^2 характеризуют общую структуру, эволюцию и турбулентное движение в атмосфере и 2) изменчивость C_n^2 обеспечивает количественную информацию о мелкомасштабной изменчивости температуры и водяного пара, а также о мелкомасштабном (сравнимом с длиной волны радиолокатора) поле скорости.

Несмотря на то что позиционный метод можно было бы предпочесть методу VAD в длительных измерениях ветров на большой высоте, последний больше подходит для детального исследования поля скоростей и константы структуры турбулентности. Например: 1) отклонение полученных точечных данных от синусоидальной волны дает информацию о кинетических свойствах поля ветра (горизонтального, вытянутого и с деформацией сдвига) и 2) вариации мощности принятого сигнала как функции азимута дают информацию о пространственном масштабе и пространственной вариации C_n^2 . Таким образом, выбор определенного метода зависит от целей исследования.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы показали, что с помощью РЛС Чатаника удастся измерить ряд параметров, важных для динамики или баланса энергии ионосферы и тропосферы—стратосферы. Поскольку эти измерения проводятся с таким временным и пространственным разрешением, которое недоступно при использовании другой аппаратуры, радиолокация может служить ценным средством изучения солнечно-атмосферных связей.

Следующие эксперименты на РЛС помогут лучше понять характер связей и взаимодействий между различными слоями атмосферы:

1) регулярные измерения вектора ветра (особенно вертикальных движений) и константы структуры турбулентности на высотах между 4 и 25 км;

2) координированные измерения в ионосфере и нижней атмосфере во время особых явлений, например в периоды интенсивных полярных сияний, солнечных вспышек, поглощений в полярной шапке, стратосферных потеплений.

Первый тип измерений обеспечит информацию о стратосферно-тропосферных связях и общей циркуляции в атмосфере. По мере накопления данных, возможно, удастся установить соотношения между характерными явлениями, связанными с Солнцем (например, прохождением секторной границы, солнечной вспышкой), и вариациями скорости и направления ветра или степени турбулентности. Кроме того, в полученных данных

может обнаружиться присутствие вертикально или горизонтально распространяющихся волн, которые в свою очередь могут быть связаны с определенным источником возмущения.

Второй тип измерений позволит исследовать возможные причинно-следственные связи между четко определенным явлением выделения энергии в ионосфере и нижней атмосферой.

Предложенные эксперименты иллюстрируют типы возможных измерений. Более детальные исследования можно будет проводить в том случае, когда будут выдвинуты определенные теории или механизмы взаимодействия.

Представленная работа была выполнена при поддержке Национального научного фонда по контракту ATM 77-16213 и в соответствии с Внутренней исследовательской программой при «С. Р. И. интернейшнл».

Литература

1. *Balsley B. B., Farley D. T.* Geophys. Res. Lett., 3, 525, 1977.
2. *Balsley B. B., Green J. L.* Coherent radar systems for probing the troposphere, stratosphere, and mesosphere. In: Preprint Vol. Fourth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, April 10–14, 1978, Denver, CO, 1978.
3. *Balsley B. B., Cianos N., Farley D. T., Baron M. J.* J. of Applied Meteor., 16, 1235, 1977.
4. *Baron M. J., Chang N. J.* Icescap '73a-Chatanika radar results', Tech. Rep. 4, SRI Proj. 3118, Stanford Research Institute, Menlo Park, CA, 1975.
5. *Kelly J. D.* Private communications, 1978.
6. *Leadabrand R. L., Baron M. J., Petriceks J., Bates H. F.* Radio Sci., 7, 1972.
7. *Ottersten H.* Radar observations of the turbulent structure in shear zones in the clear atmosphere. In: Preprint of 14th Radar Meteorology Conf., Tucson, AZ, Amer. Meteorol. Soc., Boston, MA, pp. 111–116, 1970.
8. *Vondrak R. R., Baron M. J.* Radio Sci., 11, 939, 1976.
9. *Wickwar V. B., Baron M. J., Sears R. D.* J. Geophys. Res., 80, 4634, 1975.

1-й ряд (слева направо): Бринги, Крёл, Брискин, Дж. Сингх, Кинг, Ву, Мак-Кормак, Селига, Гольдберг.

2-й ряд: Квэйт, Р. Сингх, Прасад, Эльзассер, Прохаска, Силс мл., Мак-Кинли, Мак-Фарланд, Дэвис, Ширли, Мёрс.

3-й ряд: Слипер, Чанг, Ханг, Макленнен, Хоунс, Уолт, Рейтер, Смит, Ля Шапель, Сарджент, Воронко.

4-й ряд: Мак-Артур, Рамакришна, Ачесон, Мэйнард, Столярский, Лундквист, Шили, Нэйл, Боуэн, Хилл, Лесбридж, Джамисон.

5-й ряд: Брамч, Немиас, Мендильо, Хит, Эвери, Хэйк, Роут, Кёлер, Настром, Вэйнхаймер, Гатман, Билелло, Дж. М. Митчелл, Эдди.

6-й ряд: Карлсон, Спенсер, Хартли, Броун, У. Митчелл, Питток, Салливен, Бинзак, Ливингстон, Хойт, Келлер, Хэйнс, Мэни, Какар.

7-й ряд: Вэйт, Судзука, Бартман, Фритц, Паркер, Брайер, Секрист, Шуурманс, Яргер, Базарт, Шо, Лутц, Яфолла, Хауз, Риан.

8-й ряд: Марксон, Родригес, Лакс, Киндл, Келли, Диас, Ларсен, Левис.



СПИСОК УЧАСТНИКОВ СИМПОЗИУМА

- Louis K. Acheson, Jr.* Hughes Aircraft Company, 17721 Marcello Place, Encino, CA 91316.
- Susan Avery.* Dept. of Electrical Engineering, University of Illinois, Urbana, IL 61801.
- Fred L. Bartman.* Dept. of Atmospheric & Oceanic Sci., University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109.
- John P. Basart.* Iowa State University, Coover Hall, Ames, IA 50011.
- Michael A. Bilello.* U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Lab., Snow and Ice Branch, Hanover, NH 03755.
- Joseph H. Binsack.* Laboratory for Space Experiments, Center for Space Research, Room N51-330, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139.
- Edward G. Bowen.* 5010 Maxwell Avenue, West River, MD 20881.
- Dale D. Branch.* National Weather Service, 129 S. E. Philip, Des Moines, IA 50315.
- Glenn W. Brier.* Dept. of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523.
- Streedevi K. Bringi.* Atmospheric Sciences Program, The Ohio State University, 469/2015 Neil Avenue, Columbus, OH 43210.
- Madeleine Briskin.* Department of Geology, University of Cincinnati, Old Tech. Building, Cincinnati, OH 45221.
- Charles M. Brown.* Naval Research Laboratory, Code 7146, Washington, D. C. 20375.
- Jerry A. Carlson.* Professional Farmers of America, 219 Parkade, Cedar Falls, IA 50613.
- Charles P. Gato.* Atmospheric Sciences Program, The Ohio State University, 469/2015 Neil Avenue, Columbus, OH 43210.
- Norman J. F. Chang.* Radio Physics Lab., SRI International, 333 Ravenswood Avenue, Menlo Park, CA 94025.
- Robert S. Davis.* DeNardo & McFarland Weather Services, Inc., Allegheny County Airport, West Mifflin, PA 15122.
- Henry Diaz.* National Climatic Center, Federal Building, Asheville, NC 28805.
- John A. Eddy.* National Center for Atmospheric Research, High Altitude Observatory, Box 3000, Boulder, CO 80307.
- Hugh W. Ellsaesser.* Lawrence Livermore Laboratory, P. B. Box 808, Livermore, CA 94550.
- Michael R. Foster.* Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, The Ohio State University, 2036 Neil Avenue Mall, Columbus, OH 43210.
- Sigmund Fritz.* Meteorology Program, Space Sciences Building, University of Maryland, College Park, MD 20742.
- Stuart Gathman.* Naval Research Laboratory, Code 8327, Washington, D. C. 20375.
- Richard A. Goldberg.* Laboratory for Atmospheric Sciences, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771.
- Pat Haines.* University of Dayton Research Inst., 300 College Park, Dayton, OH 45469.
- Richard D. Hake, Jr.* SRI International, 333 Ravenswood Avenue, Menlo Park, CA 94025.

- Itamar Halevy.* Department of Physics, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada M5S1A1.
- Gerald P. Hannes.* Department of Geography, California State University/Fullerton, 800 N. State College Blvd., Fullerton, CA 92634.
- Karen Harrower.* Department of Geology, University of Kansas, Lawrence, KS 66045.
- Richard E. Hartle.* Planetary Aeronomy Branch, Code 621, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771.
- Alan D. Hecht.* Climate Dynamics Program, National Science Foundation, Washington, D. C. 20550.
- Randall J. Heydinger.* 2309 North High St., Columbus, OH 43210.
- Robert Hill.* Box 5484, Montecito, CA 93108.
- Edward W. Hones, Jr.* University of California, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, NM 87545.
- Frederick B. House.* Department of Physics & Atmospheric Sci., Drexel University, Philadelphia, PA 19104.
- Douglas Hoyt.* National Oceanic & Atmospheric Admin., Environmental Research Lab. R329, Boulder, CO 80303.
- J. Hughes.* Office of Naval Research, Dept. of the Navy, Arlington, VA 22217.
- R. J. Hung.* University of Alabama in Huntsville, P. O. Box 1247, Huntsville, AL 35807.
- James C. Jafolla.* Dept. of Physics & Atmospheric Sci., Drexel University, Philadelphia, PA 19104.
- Benton Jamison.* State University of New York/Albany, E5114—1400 Washington Avenue, Albany, NY 12222.
- Gracen Joiner.* Atmospheric & Ionospheric Sciences Prog., Office of Naval Research-Code 465, Room 315, 800 N. Quincy St., Arlington, VA 22217.
- Ramesh K. Kakar.* NASA Headquarters Code ST-5, Washington, D. C. 20546.
- John Keller.* University of Dayton Research Inst. 300 College Park, Dayton, OH 45469.
- Philip M. Kelly.* Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, NR4 8TJ, Norfolk, England.
- Earl C. Kindle.* Geophysical Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA 23508.
- J. W. King.* Appleton Laboratory, Ditton Park, Slough SL39JX, Berkshire, United Kingdom.
- R. A. Koehler.* York University, 4700 Keele St., Petrie Bldg., Downsview, Ontario, Canada M3J 1P3.
- Herbert W. Kroehl.* National Oceanic & Atmospheric Admin., Environmental Data Service—D64, Boulder, CO 80302.
- Andre Lachapelle.* Atmospheric Environment Service, CCAI, 4905 Dufferin St., Downsview, Ontario, Canada M3H 5T4.
- Miguel F. Larsen.* Cornell University, 120 Phillips Hall, Ithaca, NY 14853.
- James Lax.* Atmospheric Sciences Program, The Ohio State University, 469/2025 Neil Avenue, Columbus, OH 43210.
- Mae D. Lethbridge.* Pennsylvania State University, 506 Walker Building, University Park, PA 16802.
- Curt A. Levis.* Dept. of Electrical Engineering, The Ohio State University, 1320 Kinnear Road, Columbus, OH 43212.
- W. C. Livingston.* Kitt Peak National Observatory, P. O. Box 26732, Tucson, AZ 85726.
- Charles Lundquist.* NASA/Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL 35812.
- Jeffrey T. Lutz.* Office of the Geographer, INR/RGE, Room 8742, U. S. Department of State, Washington, D. C. 20520.
- John MacArthur.* Marlboro College, Box 15, Marlboro, VT 05344.
- Carol G. MacLennan.* Bell Telephone Laboratories, Room/1E-436, Murray Hill, NJ 07974.

- K. Kurian Mani.* Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Atlanta, GA 30332.
- Ralph Markson.* Dept. of Aeronautics & Astronautics, Massachusetts Institute of Tech., Building W-91, Cambridge, MA 02139.
- Nelson C. Maynard.* NASA/Goddard Space Flight Center, Laboratory for Planetary Atmospheres, Code 625, Greenbelt, MD 20771.
- Billy M. McCormac.* Lockheed Palo Alto Research Laboratory, Dept. 52-10, Bldg. 202, 3251 Hanover St., Palo Alto, CA 94304.
- David G. McFarland.* DeNardo & McFarland Weather Services, Inc., Allegheny County Airport, West Mifflin, PA 15122.
- Michael Mendillo.* Astronomy Department, Boston University, Boston, MA 02215.
- John H. Mercer.* Institute of Polar Studies, The Ohio State University, 125 South Oval, Columbus, OH 43210.
- J. Murray Mitchell, Jr.* NOAA Environmental Data Service, Room 625, Grammax Building, 8060 13th St., Silver Spring, MD 20910.
- Walter E. Mitchell, Jr.* Department of Astronomy, The Ohio State University, 174 W. 18th Avenue, Columbus, OH 43210.
- James Monahan.* Dept. of Aeronautical & Astronautical Engineering, The Ohio State University, 2036 Neil Avenue, Columbus, OH 43210.
- Hans T. Mörth.* School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, NR4, 7TJ, United Kingdom.
- M. S. Muir.* Department of Physics, University of Natal, King George V Avenue, Durban, Natal 4001, South Africa.
- Sam I. Nakagama.* Kidder, Peabody & Co, Inc., 10 Hanover Square, New York, NY 10005.
- Jerome Namias.* Scripps Inst. of Oceanography, University of California/San Diego, La Jolla, CA 92093.
- Gregory D. Nastrom.* Control Data Corporation, P. O. Box 1249, Minneapolis, MN 55440.
- James J. Nasuti.* Department of Geography, University of Texas at Austin, Austin, TX 78712.
- James C. Neill.* Illinois State Water Survey, P. O. Box 232, Urbana, IL 61801.
- Marcel Nicolet.* External Geophysics, Brussels University, 30, Avenue Den Doorn, 1180 Brussels, Belgium.
- Roger Olson.* Aspen Institute for Humanistic Studies, 1919 Fourteenth St., 811 Boulder, CO 80302.
- Bruce C. Parker.* Department of Biology, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061.
- Barrie Pittock.* Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, AZ 85721.
- Sheo S. Prasad.* Jet Propulsion Laboratory, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91103.
- John T. Prohaska.* Solar Climatic Research Institute, 8 Mechanic Street, Marblehead, MA 01945.
- Boyd E. Quate.* Boyd E. Quate and Associates, P. O. Box 7065, Holland Station, Suffolk, VA 23437.
- S. Ramakrishna.* Dept. of Aeronautical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560012, India.
- Reinhold Reiter.* Inst. for Atmospheric Environmental Research, Kreuzteckbahnstrasse 19, D-8100 Garmisch-Partenkirchen, West Germany.
- Walter Orr Roberts.* Aspen Institute for Humanistic Studies, 1919 Fourteenth St., 811 Boulder, CO 80302.
- Raymond G. Roble.* National Center for Atmospheric Research, P. O. Box 3000, Boulder, CO 80307.
- Guillermo Rodriguez.* Rodriguez Licenciado en Ciencias Fisicas, Geofisica y Astrofisica, Las Tricias, Isla de la Palma, Canary Islands, Spain.
- Juan G. Roederer.* Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, AK 99701.

- Donald Rote.* Energy-Environment Sys. Division, Argonne National Laboratory, EES-12, 9700 Cass Avenue, Argonne, IL 60439.
- Ann W. Rudolph.* Battelle Columbus Laboratories, 505 King Avenue, Columbus, OH 43201.
- Bill C. Ryan.* United States Dept. of Agric., Forest Service, 2291 Quartz Place, Riverside, CA 92507.
- H. H. Sargent, III.* Space Environment Resources Cntr., Boulder, CO 80303.
- Philip H. Scherrer.* Institute for Plasma Research, Stanford University, Via Crespi, Stanford, CA 94305.
- Michael Schlesinger.* Dept. of Atmospheric Science and Climate Research Inst., Oregon State University, Corvallis, OR 97331.
- C. J. E. Schuurmans.* Royal Netherlands Meteorological Inst., Wilhelminalaan 10, Postbus 201, 3730, AE De Bilt, The Netherlands.
- Robert Seals.* NASA Headquarters, Code ST-5, 400 Maryland Avenue, Washington, D. C. 20546.
- C. F. Sechrist, Jr.* Aeronomy Laboratory, Electrical Engineering Dept., University of Illinois, Urbana, IL 61801.
- Thomas A. Seliga.* Atmospheric Sciences Program, The Ohio State University, 469/2015 Neil Avenue, Columbus, OH 43210.
- Glenn Shaw.* Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, AK 99701.
- Neil R. Sheeley, Jr.* Naval Research Laboratory, Code-7172, Washington, D. C. 20375.
- James H. Shirley.* Life Support Systems Group, Ltd., 2432 N. W. Johnson St., Portland, OR 97210.
- Jag J. Singh.* NASA/Langley Research Center, Mail Stop 235, Hampton, VA 23665.
- Rama N. Singh.* Institute of Technology, Baranas Hindu University, Varanasi 220005, India.
- H. Prescott Sleeper.* Kentron International, 2003 Byrd Springs Road, Huntsville, AL 35802.
- Alphonsa Smith.* NASA/Langley Research Center, Mail Stop 234, Hampton, VA 23665.
- Jesse B. Smith, Jr.* NOAA/Marshall Space Flt. Center, ES52, Huntsville, AL 35812.
- Nelson W. Spencer.* NASA/Goddard Space Flt. Center, Code 620, Greenbelt, MD 20771.
- William F. Spires.* Northern Illinois University, 221 Eldon Avenue, Columbus, OH 43204.
- Richard S. Stolarski.* NASA/Goddard Space Flt Center, Mail Code 624, Greenbelt, MD 20771.
- Thomas Sullivan.* Lawrence Livermore Laboratory, L-262, Livermore, CA 94550.
- H. Suzuka.* Canada Climatic Center, Atmospheric Environment Service, 4905 Dufferin, Downsview, Ontario M3W 5T4, Canada.
- J. Terasmae.* Department of Geological Sciences, Brock University. St. Catharines, Ontario L2S 3A1, Canada.
- Ellen Thompson.* Institute of Polar Studies, The Ohio State University, 125 S. Oval Mall, Columbus, OH 43210.
- Lonnie G. Thompson.* Institute of Polar Studies, The Ohio State University, 125 S. Oval Mall, Columbus, OH 43210.
- Jack Villmow.* Geography, Northern Illinois University, DeKalb, IL 60115.
- Hans Volland.* Radioastronomical Institute, University of Bonn, Auf dem Huegel 71, 5300 Bonn, West Germany.
- Garvin L. Von Eschen.* Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, The Ohio State University, 2036 Neil Avenue, Columbus, OH 43210.
- Paul Waite.* Iowa Department of Agriculture, Room 10, Municipal Airport Term., Des Moines, IA 50321.

- M. Walt.* Lockheed Palo Alto Research Lab., 3251 Hanover Street, Palo Alto, CA 94304.
- Eric K. Walton.* Electroscience Laboratory, The Ohio State University, 1320 Kinnear Road, Columbus, OH 43210.
- Andrew J. Weinheimer.* Space Physics Department, Rice University, Houston, TX 77001.
- John M. Wilcox.* Institute for Plasma Research, Via Crespi, Stanford University, Stanford, CA 94305.
- Stanley Woronko.* Atmospheric Environment Service, 4905 Dufferin Street, Downsview, Ontario M3H 5T4, Canada.
- S. T. Wu.* University of Alabama, P. O. Box 1247, Huntsville, AL 35807.
- Douglas N. Yarger.* Iowa State University, 313 Curtiss Hall, Ames, IA 50011.
- Edward J. Zeller.* Department of Geology, University of Kansas, Lawrence, KS 66045.

Press:

- Robert M. Boyce.* OSU COMMUNICATION SERVICES.
- Robert C. Cowen.* CHRISTIAN SCIENCE MONITOR.
- Susan Kitterman.* OSU LANTERN.
- Joe McKnight.* ASSOCIATED PRESS.
- Susan West.* SCIENCE NEWS.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Антициклоны** 59—60
высокоширотные 361—365
вызванные солнечной активностью 361—365
- Атмосферная циркуляция** 14—15, 21—23, 27
влияние солнечных вспышек 129—144
- Атмосферное давление** 19, 130—144
влияние солнечного цикла 213, 333—334
электричество 27, 52—54, 187—203, 242—264, 290—294
атмосферно-земной ток 246—248, 275—284
воздействие галактического космического излучения 188, 200, 246, 253, 271—273, 292
глобальная модель 265—274
глобальная циркуляция 245—246, 260—263
грозы 259—261
ионизирующая радиация 24—27, 182—184, 243—245, 323—332
поле 22, 24—26, 52—54, 173, 181—182, 243—247, 251—284
преобразование 15
проводимость 21, 26, 242—245, 258—263, 290—291
эффект солнечных пятен 265, 291—294
- Волны в атмосфере** 27, 58—60, 172—174
Росби 58—60
- Высота тропопаузы** 317—318
вариации 306—307, 349—353
влияние секторной границы 309—316, 349—353
ложбины 175—186
высыпание в авроральной зоне 190—203
Высыпающиеся частицы 21, 71—72, 335—341
- Галактическое космическое излучение** 27, 29—31, 54, 188, 200, 246, 265, 270—272, 292, 356—360
- Геомагнитная активность**, *aa*-индекс 41, 124—128
- Геомагнитные бури** 265, 272—273, 317—322
- Глобальная циркуляция** 21—23
- Глобальное давление** 19
- Глобальный радиационный баланс** 29—31
- Гравитационные волны** 150—151, 317—322
- Грозы в атмосфере** 15, 25—26, 54, 214, 243—280, 285—293
- Джоулево тепло** 367
- Динамика атмосферы** 29—35
- Дожди** 212—215
- Засуха** 15, 54—56, 58—60
индекс Пальмера 152—171
- Индекс атмосферной завихренности** 15—16, 19—20, 50—56, 146—148, 175—186, 204—221, 243, 260—283
- Ионизация в ионосфере** 367—370
- Ионосферно-атмосферная связь** 317—319
- Ионосферно-магнитосферная связь** 120—123, 367—370
- Ионосферно-стратосферный обмен** 24—27, 182—183, 323—332, 366—372
эффекты 110—112, 323—332
- Корональные дыры** 15, 25, 72—74
- Космическое излучение** 29—32, 188, 200, 246—258, 265
преобразование 27, 54, 270—274, 292
стратосферное оседание 353—360
- Магнитосфера** 112—116
влияние солнечной энергии 145—151
- Маундер-минимум** 152, 167—170, 230—232
- Межпланетное магнитное поле** 106—118, 175—186
взаимодействие с Землей 106—118, 318

- Метод наложенных эпох 204—208, 276—280, 283, 313—315
 границы магнитного сектора 204—208
Миланковича теория 15, 94—101
 Модели
 климатические 15, 21—23
 прогностические 77—82
- Ослабление солнечной радиации N_{0x} , ядерными взрывами**
 аэрозолями 355—359
- Планетарные волны в атмосфере** 29—33, 295—308, 313—315
 Планетарные движения 15, 23—24, 222—235
 влияние солнечного цикла 230
 периоды 209—214
 Потенциал ионосферы 20—21
 Потенциальная энергия атмосферы 172—174
 Прогноз погоды 23, 45—47, 54, 180—182, 281—283
 Протоны 31, 38, 177—180, 188
- Радиация**
 корпускулярная 27—29, 188, 190—203
 ионизирующая 242—246, 260—262
- Скрытая теплота переноса** 361—365
Солнечная активность 77—82
 выделение энергии 145—151
 изменчивость 15
 образование гравитационных волн 150—151
 прогноз 77—82
 постоянная 24—26, 63—69, 83—87, 354—360
- Солнечное вращение** 15, 124—128, 230—231
 излучение 21, 27, 61—67, 83—87, 94—101, 354—360
 видимое 88—93
 инфракрасное 68
 рентгеновское 25, 36, 67—68, 188, 190—203
 радиоволны 42, 63—65
 ультрафиолетовое 21, 25, 28—33, 68—70, 88—93, 188—193
 частицы 27, 71—73
 магнитное поле 27, 72—74, 175—186
 секторные границы 49—56, 111—113, 175—186, 204—208, 243, 248—254, 265, 275—284, 285—289
- Солнечно-погодные связи**
 общие вопросы 44—57
 физические процессы 129—144, 187—203, 217, 275—284, 309—316, 334, 349—353
 эксперименты 27—28, 187—203
Солнечные вспышки 54, 72—74, 245—246, 248, 265—272, 325—332
 корональные дыры 70—72
 приливы 223
 протоны 259
 пятна 41, 61—67, 77—82, 124—128, 152, 161—171, 230, 236—241, 265, 292—294
 прогноз 236—241
 связи, изучение 15—16, 21
Солнечный ветер 69—72, 102—123
 цикл 16, 41, 62—65, 77—82, 124—128, 152, 161—171, 236—241, 265, 292—294
 связь с погодой 209—221
Состав атмосферы 17, 27—40
 возбужденные молекулы N_2 17, 336
 механизмы преобразований 28—40, 336—337
 HNO_3 332—334
 H_2O 27
 O_3 17, 21—22, 25, 30—38, 173, 188—203, 215, 358—360
 N_2O 30—32, 339
- Статистические данные, анализ** 18—20, 204—221
Стратосферно-ионосферный ветер 367—372
 воздействия Солнца 112—114, 323—332
Стратосферный нагрев 16
- Температура атмосферы** 94—101, 214
 энергетический спектр 342—348
 влияние солнечного цикла 342—348
Три круга данных 153—171
Тропосферные движения 21
Тропосферная циркуляция 172—186, 291—293
Тропосферное давление 317—319
Тропосферные воздействия 15
- Форбуш-эффект** 52, 270—272, 292
- Химия ионов** 336—337
- Электрическое поле** 276—280, 283
Электромагнитная радиация 27
Электроны 38—40, 188, 190—203, 336
Энергия магнитосферы 112—116

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие	12
Итоги симпозиума и рабочего совещания. <i>Б. М. Мак-Кормак, Т. А. Селига</i>	13
О связи погоды и климата с солнечными явлениями (вводный обзор). <i>В. О. Робертс</i>	44
Загадка засухи бросает вызов науке. <i>Дж. Немиас</i>	58
Поток солнечного излучения в системе солнечно-земных связей. <i>У. К. Ливингстон</i>	61
Анализ регрессионных методов прогноза солнечной активности. <i>Ч. А. Лундквист, У. У. Вогэн</i>	77
Вариации солнечной постоянной вследствие изменений в активных областях на Солнце. <i>Д. В. Хойт</i>	83
Изменчивость и абсолютная величина спектральной плотности излучения Солнца. <i>Г. Е. Шо, К. Фрёлых</i>	88
Эмпирическая модель реакции атмосферы на астрономические вариации инсоляции. <i>Ф. Б. Хауз</i>	94
Связь между солнечным ветром, ионосферой и магнитосферой. <i>Е. У. Хоунс мл.</i>	102
Индекс повторяемости геомагнитной активности. <i>Г. Х. Сарджент III</i>	124
Эффекты солнечных вспышек в атмосферной циркуляции. <i>К. И. Е. Шурманс</i>	129
Выделение энергии в атмосфере Земли под воздействием возмущений, вызванных солнечной активностью <i>С. Т. Ву, Л. С. Кан, Е. Тандберг-Хансен, М. Драйер</i>	145
Доказательство 22-летнего ритма засух в западной части США, связанных с солнечным циклом Хэйла начиная с XVII в. <i>Дж. М. Митчелл мл., Ч. У. Стоктон, Д. М. Меко</i>	152
Свободная потенциальная энергия в средней атмосфере и ее связь с солнечно-погодными явлениями. <i>М. Ф. Ларсен, М. С. Келли</i>	172
Влияние магнитного поля Солнца на циркуляцию тропосферы. <i>Дж. М. Уилкоккс</i>	175
Экспериментальные поиски причинных механизмов связи погоды и климата с Солнцем. <i>Р. А. Гольдберг</i>	187
Статистическая значимость данных по методу наложенных эпох. <i>Б. Джамисон, Р. Регал</i>	204
Связь солнечных циклов и погоды — не результат ли удачных опытов самовнушения? <i>А. Б. Питток</i>	209

Движение планет, солнечные пятна и климат. <i>Х. Т. Мёрс, Л. Шламмингер</i>	222
Использование метода разностных уравнений для прогноза числа солнечных пятен. <i>Г. У. Брайер</i>	236
Атмосферное электричество и проблема связи между солнечной активностью и погодой. <i>Р. Марксон</i>	242
Электрическая связь между верхней и нижней атмосферой. <i>Р. Дж. Робл, П. Б. Хейс</i>	265
Влияние солнечной активности на электрический потенциал между ионосферой и земной поверхностью. <i>Р. Рейгер</i>	275
Частота гроз и солнечные секторные границы. <i>М. Д. Лесбридж</i>	285
Роль атмосферного электричества в связи погоды с солнечной активностью. <i>М. С. Мюир</i>	290
Возможные механизмы воздействия солнечной активности на погоду, связанные с планетарными волнами. <i>Г. Волланд</i>	295
Планетарные волны на уровне 500 мбар в северном полушарии и их связь с вращением Солнца. <i>Дж. Шефер</i>	309
Роль гравитационных волн в солнечно-атмосферных связях и обнаружение сильных возмущений атмосферы. <i>Р. Дж. Ханг, Р. Е. Смит</i>	317
Влияние солнечной активности на интенсивность обмена между стратосферой и тропосферой. <i>Р. Рейгер</i>	323
Влияние Солнца на среднее давление на уровне моря в Северной Атлантике. <i>П. М. Келли</i>	333
Некоторые аспекты реакции стратосферной химии на высыпание солнечных частиц: потенциальная роль $N_2(A^3\Sigma)$ и химии ионов. <i>Ш. С. Прасад</i>	335
Спектральный анализ длинных температурных рядов. <i>К. Г. Макленнен, Л. Дж. Ланцеротти</i>	342
Предварительное сообщение об изменениях высоты тропопаузы в связи с вариациями в солнечной активности. <i>Дж. П. Базарт, Д. Н. Яргер</i>	349
Стратосферный механизм солнечного и антропогенного влияния на климат. <i>К. Я. Кондратьев, Г. А. Никольский</i>	354
Высокоширотный антициклогенез и увеличение переноса скрытой теплоты. <i>Дж. Х. Ширли</i>	361
Исследование солнечно-атмосферных связей с помощью РЛС Чатаника. <i>Н. Дж. Ф. Чанг</i>	366
Список участников симпозиума	375
Предметный указатель	379

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва И-110, 1-й Рижский пер., д. 2, изд-во «Мир».

п/ред. Билли М. Мак-Кормака, Томаса А. Селиги
СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ, ПОГОДА И КЛИМАТ

Научные редакторы Э. А. Медушевская, В. А. Пантаева
Мл. научные редакторы И. А. Гревцова, Л. П. Лебедева
Художник Е. К. Самойлов
Художественный редактор М. Кузьмина
Технический редактор Н. И. Борисова
Корректор А. Ф. Рыбальченко

ИБ № 2919

Сдано в набор 20.01.82. Подписано к печати 16.08.82. Формат
60×90^{1/16}. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная.
Печать высокая. Объем 12,00 бум. л. Усл. печ. л. 24,00.
Усл. кр.-отт. 24,00. Уч.-изд. л. 23,31. Изд. № 27/1613.
Тираж 3500 экз. Зак. 154. Цена 3 р. 80 к.

Издательство «Мир». 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й
Рижский пер., 2.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного
Знамени Ленинградского объединения «Техническая
книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.

4073