

УДК 523.98:550.385

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ В УСЛОВИЯХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕЧНЫХ СОБЫТИЙ

© 2003 г. А. А. Шапиро, Ю. В. Гончаренко

*Институт радиопрофики и электроники НАН Украины, Харьков*

Поступила в редакцию 15.04.2002 г.,

После доработки 18.03.2003 г.

С помощью метода дистанционного радиозондирования на трассах дальнего тропосферного распространения установлена связь вспышечных солнечных явлений с процессами, происходящими в нижних слоях земной атмосферы. На основе модели атмосферного фильтра выполнен анализ эволюции этих процессов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Физические процессы, протекающие в верхних слоях атмосферы и тропосфере, характеризуются большим разнообразием и разномасштабностью в пространстве и во времени. Они включают в себя энергообменные, массообменные, электромагнитные, ядерно-химические и другие взаимодействия и настолько сложны в своей взаимосвязи, что явление, даже частичное, в рамках известных теорий функциональных зависимостей между преобладающими процессами оказывается трудно разрешимой задачей.

Основной опорой для объективного описания реализующихся в природе физических механизмов является информация, получаемая в результате экспериментальных исследований. Поэтому использованию и развитию экспериментальных методов исследования уделяется все большее внимание. В частности, одним из эффективных методов, позволяющих оценивать интегральные характеристики атмосферы, является метод радиозондирования.

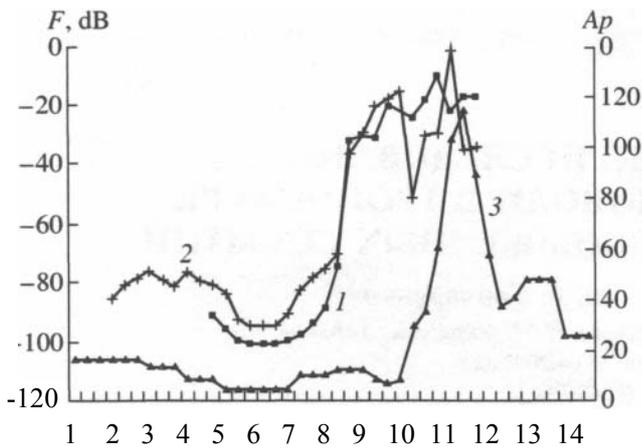
Ниже приводится часть экспериментальных данных из полученных методом дистанционного зондирования тропосферы и имеющих непосредственное отношение к солнечным событиям 1967-1968 гг., а также анализ некоторых известных из литературы гипотез о солнечно-земных связях, в рамках которых могут быть истолкованы эти данные.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ

Изучение экспериментальных данных, полученных на трассах дальнего тропосферного распространения (ДТР), показало, что после сильных солнечных вспышек наблюдалось значительное

уменьшение абсолютного значения множителя ослабления со значения (80-100) дБ, которое наблюдалось во времени, предшествующем вспышке, до значений (10-30) дБ. Трассы ДТР имели следующие параметры: несущая частота - 200 МГц, длина трасс - 600 км. Приемные пункты располагались в Никитском ботаническом саду (г. Ялта) на уровне моря и на горе Ай-Петри, на высоте =1200 м. Стабилизированный по мощности передатчик непрерывного излучения находился в г. Батуми на уровне моря. Передатчик и приемники также имели направленные антенны, что давало возможность в определенных высотных пределах реализовать пространственную избирательность в вертикальной плоскости. Геометрия трасс позволяла делать предварительный анализ процессов, происходящих на трассе ДТР. Так как приемные станции были разнесены по высоте, то изменения уровня сигнала, связанные с волноводным распространением радиоволн, могли быть зарегистрированы только на одной из них. При наличии приводного волновода увеличение уровня сигнала было бы зарегистрировано первым приемником, расположенным на уровне моря, в случае приподнятого волновода - вторым.

На рисунке представлено изменение множителя ослабления  $F$  в течение вспышки 8 июня 1968 г. и после нее. Исследование спектра принятого сигнала показало, что уменьшение абсолютного значения множителя ослабления является следствием появления в спектре принятого сигнала когерентной составляющей большой интенсивности. Это показывает, что в данном случае имеет место не диффузное рассеяние радиоволн, происходящее на неоднородностях тропосферы, а их частичное отражение. Так как изменение множителя ослабления фиксировалось обоими приемниками, можно предположить, что в данном случае имел место не волноводный механизм распространения



Изменения множителя ослабления  $F$  с 1 по 14 июня 1968 г. на трассах дальнего тропосферного распространения (ДТР): 1 - Никитский ботанический сад-Батуми; 2 - Ай-Петри-Батуми относительно индекса геомагнитной активности  $A_p$  (3) для случая солнечной вспышки 8 июня 1968 г.

радиоволн, а их отражение от инверсионных слоев в тропосфере. Анализ направленности приемной и передающей антенн определил расположение объема атмосферы, в котором происходило зеркальное отражение: он находился в верхней тропосфере на высоте 7-9 км.

За время проведения эксперимента было зарегистрировано пять вспышек, во время четырех из которых имели место изменения величины множителя ослабления, аналогичные приведенным на рисунке. Необходимо отметить, что в отсутствие солнечных вспышечных событий эффекты такого рода не наблюдались.

Одними из основных метеорологических параметров, отражающих состояние атмосферы, являются температура, давление и влажность воздуха. Эти же параметры определяют индекс рефракции атмосферы, играющий важную роль при распространении радиоволн [1]. Зависимость индекса рефракции  $N$  от температуры, давления и влажности для волн метрового и дециметрового диапазонов может быть выражена известным соотношением

$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 599.7 \frac{sp}{T^2} \quad (1)$$

где  $p$  - атмосферное давление;  $T$  - температура воздуха;  $s$  - удельная влажность воздуха.

Пространственные вариации метеорологических параметров и, как следствие, вариации индекса рефракции могут влиять на кривизну траектории распространения радиоволн, приводить к появлению многолучевого распространения, а движение таких неоднородностей может приводить к изменению спектра принимаемого сигнала.

В тропосфере барические и температурные градиенты в основном реализуются при энергообменных вихревых процессах, требующих для их «раскачки» достаточно большой энергии и длительности воздействия, которая из-за относительной кратковременности вспышечных ситуаций недостаточна для развития масштабных процессов. В энергетическом плане, как показывают расчеты [2], для инициирования указанных процессов величины вариаций солнечной постоянной должны составлять 1-2% и более. Фактические изменения величины солнечной постоянной при различных вариациях солнечной активности не превышают 0.1-0.2%, что на порядок меньше необходимой [2]. Из этого можно сделать вывод, что возникновение градиентов давления и температуры вследствие масштабных вихревых процессов, инициируемых вспышками, в наблюдаемых нами случаях маловероятно.

Возникновение зафиксированного в эксперименте отражающего слоя (области) можно было бы объяснить механизмом прямого воздействия на атмосферу такого фактора солнечной вспышки как высокоэнергетических солнечных космических лучей (СКЛ). Такие лучи способны создавать в тропосфере зоны повышенной ионизации, обусловленные ливневыми ядерно-химическими процессами, тем более, что, согласно литературным источникам, они способны проникать в глубину атмосферы до высот 8-10 км и менее. Однако опубликованных сведений об электронно-ионной концентрации и пространственно-временных характеристиках таких образований авторами обнаружено не было, и это не дает возможности произвести объективную оценку их отражающих и рассеивающих свойств.

Как было отмечено выше, существенными физическими параметрами, влияющими на процесс распространения радиоволн в тропосфере, являются величина и градиент индекса рефракции  $N$ . В соответствии с (1) они в значительной мере зависят от величины и градиента удельной влажности  $S$ . Известны теоретические исследования [4], в которых в качестве возможного механизма изменения влажности предположительно указываются ядерные процессы. Эти процессы могут стимулировать в каких-либо областях пространства тропосферы протекание реакций, обеспечивающих увеличение влажности за счет объединения молекул кислорода и водорода воздуха в молекулы воды. К сожалению, каких-либо данных, свидетельствующих о протекании таких процессов в реальных условиях, в [3] также не приводится.

Анализ и обобщение полученных в последнее время результатов работ [3, 4] дали возможность предложить модель влияния солнечных событий на свойства атмосферы и, в частности, тропосферы [4]. Эта модель обосновывает целый ряд полу-

ченных экспериментально фактов и логически согласована с физическими явлениями и энергетическими характеристиками взаимодействующих физико-химических, метеорологических, геомагнитных и солнечных агентов. Конечно, ряд процессов, описываемых моделью, еще требует более детального изучения, однако в целом она непротиворечива и может позволить существенно продвинуться в анализе и интерпретации процессов солнечно-земного взаимодействия. Эта модель предполагает, что атмосфера может рассматриваться как регулируемый оптический фильтр, способный изменять свои поглощающие и рассеивающие свойства под влиянием факторов, обусловленных вариациями солнечной активности и магнитного поля Земли. Активными составляющими оптического фильтра являются содержащиеся в атмосфере  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  и другие, которые могут влиять на диссипацию солнечного электромагнитного излучения в средней и верхней частях нижней атмосферы в диапазоне высот 10-30 км. При этом эволюцию реализующихся процессов воздействия можно в общих чертах описать следующим образом. На временных интервалах, в течение которых отсутствуют вспышечные процессы на Солнце, в земную атмосферу проникают галактические космические лучи (ГКЛ) с энергией 0.5-2 ГэВ. Их пространственное распределение определяется магнитным полем, являющимся результатом взаимодействия собственного магнитного поля Земли и относительно стабильного магнитного поля, вмороженного в поток плазмы спокойного Солнца, достигшей пределов магнитосферы. При этом ГКЛ создают в толще атмосферы определенную концентрацию  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$ , обеспечивающую "среднюю" прозрачность при прохождении к земной поверхности электромагнитного излучения Солнца. При возникновении сильных солнечных вспышек наиболее быстро атмосферного фильтра достигают рентгеновское и ультрафиолетовое вспышечные излучения, а также поток высоко энергичных солнечных космических лучей (СКЛ). Ультрафиолетовое и рентгеновское излучения резко повышают интенсивность физико-химических процессов, вызывающих увеличение концентрации  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$ , что и приводит к изменению оптических свойств фильтра: при возрастании концентрации  $\text{NO}_2$  прозрачность атмосферного фильтра уменьшается и соответственно уменьшается поток электромагнитной энергии Солнца, поступающего в нижнюю тропосферу. Это приводит к падению температуры слоя тропосферы под фильтром и к конденсации в нем водяного пара с образованием капель на ядрах, образующихся под воздействием вторгающихся вспышечных СКЛ. Достоверность этого вывода может быть подтверждена тем, что, как указано в [5], слой тропосферы на высоте 8-9 км характеризуется повышенным содержанием водя-

ного пара. Естественно, образовавшийся в результате фазовых переходов влаги слой может вызвать отражение падающих на него радиоволн. Возникновение отражающего слоя на высоте 9 км и было зафиксировано в нашем эксперименте при радиолокационном зондировании тропосферных каналов.

Возвращаясь к описанию эволюции солнечно-земного взаимодействия, временную последовательность событий можно продолжить следующим образом.

После прекращения воздействия на атмосферу рентгеновского и ультрафиолетового излучений, связанных с солнечной вспышкой, а также СКЛ, в фильтровом слое начинают преобладать релаксационные процессы, уменьшающие концентрацию активных составляющих фильтра, тем самым просветляя его. Помимо этого, поток солнечной вспышечной плазмы, достигающий орбиты Земли через 1.5-2 сут после вспышки и интенсивно возмущающий геомагнитное поле, вытесняет из околоземного пространства галактические космические лучи (Форбуш-эффект). Это также приводит к уменьшению концентрации активных составляющих фильтра.

Процесс «просветления» фильтра сопровождается повышением температуры под его слоем и испарением сконденсировавшейся влаги, если она не выпала в виде осадков после конденсации на ионах, произведенных СКЛ. В пользу возможности реализации такого процесса свидетельствуют данные о том, что во время вторжения СКЛ отмечается увеличение интенсивности осадков на 10%, а во время Форбуш-понижений ГКЛ интенсивность осадков уменьшается приблизительно на 17% [6]. Можно предположить, что приведенные в [7] данные связаны именно с функционированием атмосферного фильтра, поскольку они хорошо коррелируют с описанными процессами в фильтровом слое атмосферы.

Таким образом, описанная динамика процессов в рамках модели атмосферного фильтра, на наш взгляд, позволяет достаточно убедительно трактовать полученные экспериментальные результаты при дистанционном зондировании тропосферных каналов.

### 3. ВЫВОДЫ

1. Дистанционные методы радиолокационного зондирования позволяют получать данные о физических процессах, протекающих в тропосфере, их пространственной локализации и временной эволюции.

2. Экспериментальные исследования радиолокационным методом двух тропосферных трасс протяженностью 600 км, проведенные в периоды времени, включающие предвспышечную, вспышеч-

ную и послевспышечную ситуации, показали, что при солнечной вспышке в тропосфере возникает инверсионный слой, создающий аномалию в распространении радиоволн по сравнению с довспышечными условиями. Возникновение этого слоя можно объяснить быстрым падением температуры в верхнем слое тропосферы и интенсивной конденсацией на ядрах, создаваемых СКЛ, водяного пара с образованием капель. Зафиксированная высота отражающего слоя -8-9 км соответствует области повышенной влажности в тропосфере, что является фактом, установленным экспериментально и описанным в литературе.

3. Полученные экспериментальные данные находят удовлетворительную трактовку в рамках модели управляемого атмосферного фильтра. Такой фильтр изменяет степень пропускания потока электромагнитной энергии Солнца под воздействием рентгеновского и ультрафиолетового вспышечных излучений, а также в процессе послевспышечного Форбуш-понижения галактических космических лучей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грудинская Т.П.* Распространение радиоволн // М.: Высшая школа. 244 с. 1967.
2. *Мирошниченко Л.И.* Солнечная активность и Земля // М.: Наука. 95 с. 1981.
3. Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Семеги // М.: Мир. 376 с. 1982.
4. *Пудовкин М.И., Распопов ОМ.* Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 5. С. 1-21. 1992.
5. *Пудовкин М.И., Дементьева АЛ.* Вариации высотного профиля температуры в нижней атмосфере во время солнечных событий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 3. С. 84-91. 1997.
6. *Стожков Ю.И., Покревский П.Е., Зулло Ж мл., Марьин ИМ., Охлопков В.П., Пеллегрини Ж.К., Пинто Х.С., Безерра П.С., Турелли А.мл.* Воздействие потоков заряженных частиц на интенсивность осадков // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36, №4. С. 211-216. 1996.