

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ**



*имени  
П.Н. Лебедева*

**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

В.И. ВЛАСОВ, И.В. ЧАШЕЙ, П.М. СВИДСКИЙ

**2**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ  
ВОЗМУЩЕНИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ  
МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ  
КОСМИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ**

МОСКВА 2009

## Аннотация

Рассматриваются ключевые параметры радиоастрономических данных, пригодные для прогнозирования геофизических возмущений. Делается вывод о реальной возможности краткосрочного предсказания геомагнитных возмущений по радиоастрономическим данным. Обсуждаются основные вопросы практической реализации такого прогнозирования и, в частности, проблемы постановки радиоастрономического мониторинга межпланетной среды.

## Abstract

Key parameters of IPS radio astronomical data are considered applicable to geophysical disturbances forecast. The conclusion is deduced on real short time geomagnetic disturbances predictions using radio astronomical observations. Main problems of geomagnetic forecast practical realization are discussed, in particular, possible performance of turbulent interplanetary plasma radio astronomical monitoring.

## **Прогнозирование геофизических возмущений по наблюдениям межпланетных мерцаний космических радиисточников.**

Власов В.И.,<sup>1</sup> Чашей И.В.,<sup>1</sup> Свидский П.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Пушинская радиоастрономическая обсерватория ФИАН, г. Пушино (Московская обл.)*  
[vlasov@prao.ru](mailto:vlasov@prao.ru), [chashey@prao.ru](mailto:chashey@prao.ru)

<sup>2</sup>*Институт прикладной геофизики им. Е.К. Фёдорова Росгидромета, г. Москва*  
[svidsky@mail.ru](mailto:svidsky@mail.ru)

### **1. Введение**

Существование разнообразных солнечно-земных связей, помимо прямого обеспечения жизни на Земле теплом и светом от Солнца, сейчас не вызывает сомнений. Их изучение все более приобретает также практическую направленность. Сейчас по аналогии с привычным понятием погоды на Земле в обиход внедряется понятие «космическая погода», справедливо отождествляемое в первую очередь с воздействием солнечной активности на Землю. Очевидно при этом, что любую погоду желательно знать заранее, уметь ее прогнозировать. Очевидно также, что для прогнозирования необходима информация, своевременно и непрерывно получаемая всеми возможными методами. Радиоастрономические методы и особенно метод картографирования межпланетной плазмы, в принципе, имеют уникальные возможности в этом отношении, поскольку позволяют вести наблюдения практически непрерывно, охватывая одновременно широкую область пространства. Важной задачей при этом является исследование распространяющихся от Солнца крупномасштабных межпланетных возмущений вспышечного происхождения, изучение их связи с активными процессами на Солнце, анализ их воздействия на Землю и, наконец, внедрение результатов в службу прогнозирования космической погоды. Принципиальная возможность краткосрочного (1-3 суток) прогнозирования геомагнитной активности по межпланетным мерцаниям радиисточников была высказана нами ранее в [1-4] на основании прямой корреляционной зависимости между Ар-индексом и средним по небу индексом межпланетных мерцаний. Об этом же, как о новом методе прогнозирования геомагнитной активности, было заявлено также в работе [5].

## **2. Как и что видит радиоастрономия в межпланетной среде.**

### **Основы радиоастрономических методов исследования межпланетной среды.**

Для исследований межпланетного пространства мы используем методы просвечивания. Они основаны на изучении влияния среды между наблюдателем на Земле и далеким космическим радиоисточником на проходящее сквозь неё радиоизлучение. Как известно, околосолнечное и межпланетное пространство заполнено неоднородной межпланетной плазмой, непрерывно вытекающей с большими скоростями наружу от Солнца. Это так называемый солнечный ветер. Неоднородности электронной плотности солнечного ветра являются для радиоволны неоднородностями показателя преломления. В результате будут наблюдаться различные дифракционные эффекты. В основном это рассеяние (проявляется, как – увеличение видимых размеров источника) и интерференция радиоволн. В результате интерференции, в плоскости наблюдения (на поверхности Земли) возникает случайная дифракционная картина, которая движется относительно наблюдателя со скоростью, примерно равной скорости солнечного ветра. Основной вклад в индекс мерцаний вносят неоднородности с масштабом, соответствующим масштабу первой зоны Френеля (порядка 100 км). Это движение дифракционной картины вызывает быстрые (порядка 1 секунды) изменения интенсивности регистрируемого радиотелескопом радиоизлучения – межпланетные мерцания космических радиоисточников.

При определенных условиях в среде, может наблюдаться рефракция – смещение видимого положения радиоисточника, а также фокусировка радиоволн. Кроме того, в зависимости от вида радиоизлучения рассеяние может проявляться, как уширение короткого импульса излучения или как уширение узкой спектральной линии. При монохроматическом сигнале (например, от источника на космическом аппарате) могут непосредственно наблюдаться флуктуации фазы.

### **Межпланетные мерцания космических радиоисточников**

Здесь мы будем рассматривать только мерцания космических радиоисточников широкого спектра излучения, как наиболее эффективный инструмент для исследования солнечного ветра радиоастрономическими методами.

Наиболее широко используемыми величинами при наблюдениях межпланетных мерцаний являются индекс мерцаний  $m$ , характеризующий глубину модуляции регистрируемой интенсивности радиоисточника, и скорость  $V$  дифракционной картины, характеризующая скорость солнечного

ветра. Индекс мерцаний (относительная дисперсия) определяется из наблюдений, как:

$$m^2 = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle / \langle I \rangle^2$$

где  $I(t)$  – регистрируемая радиотелескопом интенсивность мерцающего радиоисточника,  $t$  - время,  $\langle I(t) \rangle = I_0$  – средняя интенсивность этого (не мерцающего) радиоисточника, а угловые скобки означают усреднение по времени.

Скорость  $V$  движения дифракционной картины измеряется по наблюдениям мерцаний на нескольких (желательно не менее трех) пространственно разнесенных радиотелескопах. Скорость определяется по пройденному дифракционной картиной расстоянию между радиотелескопами и соответствующему времени запаздывания мерцаний.

### Области пространства, зондируемые методами мерцаний

Заметим, что в отличие, например, от измерений на космических аппаратах, производимых в одной определенной точке пространства, радиоастрономический метод дает информацию в каждый момент времени обо всей толще межпланетной плазмы вдоль луча зрения. В принципе, вклад в формирование мерцаний дает вся межпланетная плазма, находящаяся на луче зрения от наблюдателя до внешней границы гелиосферы.

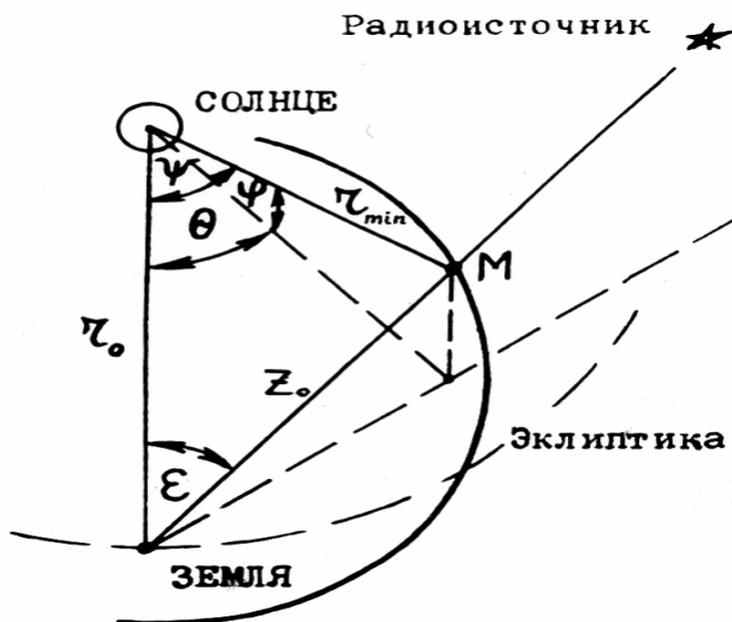


Рис.1. Схема наблюдений мерцающих радиоисточников.

Однако максимальный вклад в мерцания дает слой неоднородностей конечной толщины, локализованный в определенном месте на луче зрения. Этот слой мы называем эффективным слоем. В связи с тем, что флуктуации электронной концентрации  $\Delta N_e$  сильно зависят от их гелиоцентрического

расстояния  $\langle \Delta N_e^2 \rangle \propto r^{-4}$ , наибольший вклад в мерцания радиоисточника дает область наибольшего сближения луча зрения с Солнцем, на прицельном расстоянии  $r_{\min} = r_0 \sin \varepsilon$  (область М на Рис.1). Расстояние от наблюдателя на Земле до центра эффективного слоя неоднородностей равно  $z_0 = r_0 \cos \varepsilon$ . Здесь  $\varepsilon$  – элонгация (угловое расстояние между источником и Солнцем),  $r = 1$  а.е. Заметим также, что методом мерцаний просматривается не вся внутренняя гелиосфера. Вдали от Солнца, где электронная плотность в солнечном ветре мала, мерцания слабые. С приближением к Солнцу (с ростом электронной концентрации) мерцания возрастают, но на определенном расстоянии от Солнца начинает преобладать рассеяние радиоволн, видимые угловые размеры наблюдаемых источников растут, и мерцания быстро затухают.

Пространственное положение этих областей, где преобладают эффекты мерцаний или рассеяния, зависят от радиочастоты наблюдений. На рис.2 показаны зависимости индекса мерцаний от элонгации, полученные из наблюдений межпланетных мерцаний разными авторами, на разных частотах [7-9]. Данные этого рисунка могут быть полезны для принятия практических решений при организации наблюдений в целях прогнозирования.

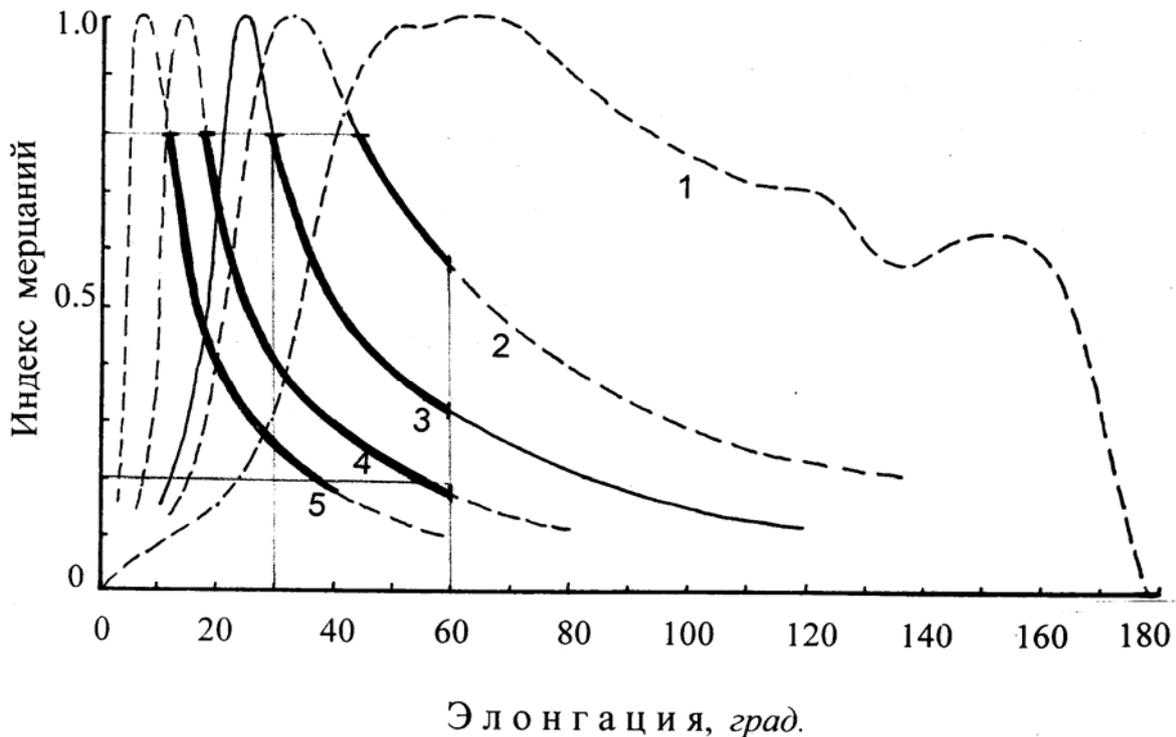


Рис.2. Зависимость среднего индекса мерцаний от элонгации.

Выделенные фрагменты на кривых приблизительно показывают пределы расстояний (элонгаций) от Солнца, где мерцания информативны для прогнозирования, т. е. где вариации индекса мерцаний адекватно отражают

состояние межпланетной плазмы. Эти фрагменты мы условно ограничили по индексу мерцаний (сверху) величиной  $m = 0.8$ , чтобы обеспечить «свободу» для положительных вариаций. Нижняя граница  $m = 0.2$  выбрана из соображений реальных характеристик радиотелескопа и наличия достаточного числа мерцающих радиоисточников. На рисунке четко видна зависимость зондируемых областей от частоты наблюдений. Видно, например, что, наблюдения мерцаний на низких частотах (кривая 1) не пригодны для прогнозирования, т.к. источники мерцают уже запоздало, далеко за пределами орбиты Земли. Наши наблюдения на частоте 102.5 МГц (кривая 3) позволяют контролировать состояние межпланетной плазмы начиная с гелиоцентрических расстояний 0.4-0.5 а.е..

### Метод картографирования индексов межпланетных мерцаний

Наиболее информативным для исследований крупномасштабных возмущений солнечного ветра показал себя метод картографирования межпланетной плазмы, впервые реализованный нами в 1975 году [1,10]. Он основан на получении двумерного пространственного распределения индексов мерцаний для большого числа равномерно рассеянных по небу космических радиоисточников. Но индекс мерцаний непосредственно

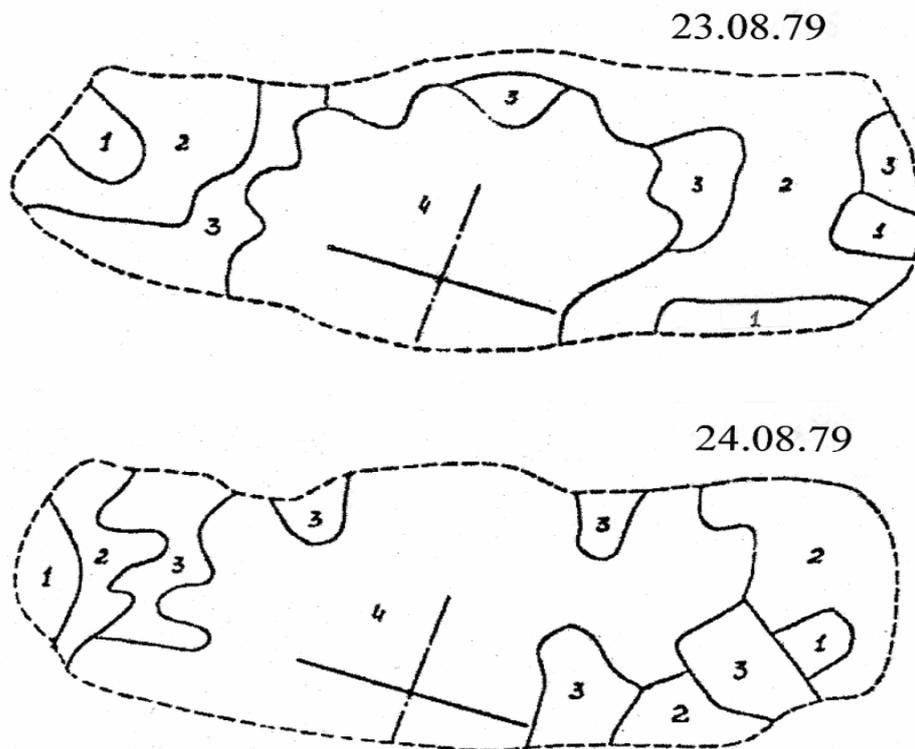


Рис.3 Карты пространственного распределения индексов межпланетных мерцаний: 1 – интервалы индексов мерцаний  $0.2 \geq m > 0$ ; 2 -  $0.4 \geq m > 0.2$ ; 3 -  $0.6 \geq m > 0.4$ ; 4 -  $m > 0.6$

зависит от состояния межпланетной среды. Между ним и характеристиками электронной плотности межпланетной плазмы имеется прямая зависимость [13]:

$$m^2 \propto \langle \Delta n^2 \rangle \propto \langle \Delta N_e^2 \rangle \propto \langle N_e^2 \rangle$$

(здесь  $m$  – индекс мерцаний,  $\Delta n$  - флуктуации показателя преломления межпланетной плазмы,  $\Delta N_e$  - флуктуации электронной плотности,  $N_e$  - электронная плотность). Поэтому карты индексов мерцаний фактически являются картами межпланетной турбулентной плазмы, т.е. представляют собой ее двумерное изображение в картинной плоскости неба. Получается изображение межпланетной плазмы, подобное фотографиям солнечной короны. Этот метод дает уникальную возможность (других способов пока не существует) видеть состояние межпланетной плазмы и происходящие в ней процессы в целом, в масштабах внутренней гелиосферы. Пример таких пространственных карт показан на рис.4. Каждая карта получена [11] нанесением ежедневных значений индексов мерцаний на экваториальную сетку координат согласно пространственному расположению соответствующих мерцающих радиоисточников. В течение дня наблюдалось порядка 150 мерцающих источников. Измеренные индексы мерцаний нормировались к индексу мерцаний точечного источника, чтобы исключить влияние размеров и структуры наблюдаемых радиоисточников. Значения индексов мерцаний разделены по величине на четыре интервала:  $0.2 \geq m > 0$ ,  $0.4 \geq m > 0.2$ ,  $0.6 \geq m > 0.4$ ,  $m > 0.6$ . На картах эти интервалы обозначены соответственно индексами от 1 до 4 и отделены друг от друга сплошными линиями. Пунктир обозначает границу наличия и отсутствия данных. Положению Солнца соответствует пересечение двух прямых, обозначающих полярное направление и линию пересечения плоскости солнечного экватора с картинной плоскостью.

С 1975 по 1985 годы нами было получено несколько серий таких карт, регулярных, ежедневных, протяженностью в среднем по 50-60 дней каждая. На регулярных рядах таких карт наблюдается непрерывно меняющаяся день ото дня картина крупномасштабных неоднородностей в виде отдельных «облаков» и сравнительно долгоживущих (в течение нескольких суток и более) неоднородностей в виде «языков», вытянутых более плотных областей межпланетной плазмы. Из сравнения карт разных периодов видно, что характерная структура крупномасштабных неоднородностей в среднем не меняется. Всегда выделяется эти два типа крупномасштабных неоднородностей: неоднородности, время изменения которых составляет порядка суток, и неоднородности, живущие несколько суток и даже месяцев.

## Крупномасштабные возмущения в солнечном ветре, видимые в межпланетных мерцаниях

Из наблюдений разнообразных геофизических явлений и из сопоставления их с солнечными и межпланетными явлениями ясно, что геоэффективными, вызывающими заметные возмущения на Земле, являются крупномасштабные возмущения в солнечном ветре. Радиоастрономические наблюдения межпланетных мерцаний, прямые измерения характеристик межпланетной плазмы на космических аппаратах, исследования солнечно-земных связей показывают, что в межпланетном пространстве преобладают два типа крупномасштабных возмущений:

1. Долгоживущие, вращающиеся с Солнцем (коротирующие) высокоскоростные ( $>500$  км/с) потоки солнечного ветра. Источниками таких потоков являются корональные дыры на Солнце. Истечение высоко - скоростного солнечного ветра из корональных дыр имеет радиальную направленность и происходит непрерывно на протяжении времени их жизни, иногда в течение нескольких оборотов Солнца. В результате, в межпланетном пространстве образуется крупномасштабная спиральная структура солнечного ветра. В области взаимодействия этого быстрого и окружающего медленного солнечного ветра формируется межпланетная ударная волна с резким сжатием и усилением плотности межпланетной плазмы и магнитного поля на переднем фронте волны.

2. Распространяющиеся от Солнца возмущения типа взрывных ударных волн. Они связаны с кратковременными проявлениями солнечной активности типа вспышек, возбуждаются вблизи от Солнца и расширяются радиально от места возникновения. Межпланетные ударные волны в основном

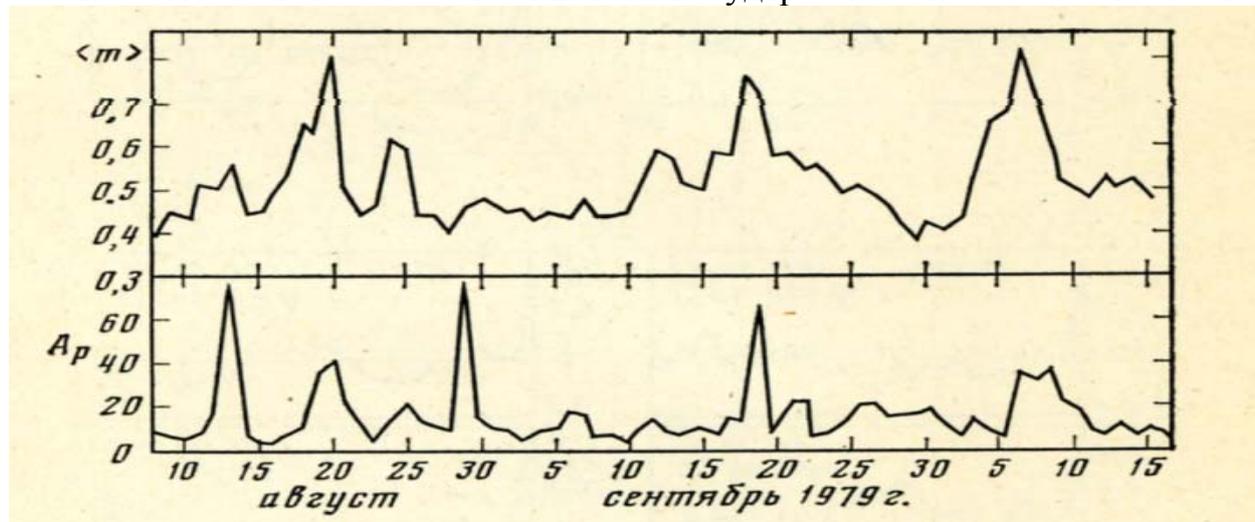


Рис.4 Зависимость индексов мерцаний  $\langle m \rangle$  и геомагнитной активности  $A_p$  от даты наблюдений.

формируются на передних фронтах выбросов корональной массы (CME – Coronal Mass Ejection) из Солнца. Для таких выбросов характерно резкое сжатие и усиление флуктуаций плотности межпланетной плазмы и магнитного поля на фронте волны. Их иногда называют также магнитными облаками, поскольку внутри заполнены вращающимся магнитным полем.

В наблюдениях межпланетных мерцаний крупномасштабные возмущения проявляются:

- как вариации индекса мерцаний на кривых  $m(t)$ , (пример на рис.4),
- как максимумы пространственно-временных функций корреляции,
- как неоднородности, наблюдаемые непосредственно на картах индексов мерцаний.

### **3. Характеристики распространяющихся возмущений типа межпланетных ударных волн, наблюдаемых по радио мерцаниям**

#### **Ключевые радиоастрономические данные для прогнозирования космической погоды.**

Первым, главным условием применимости радиоастрономических данных для такого прогнозирования, очевидно, является своевременное обнаружение крупномасштабных геоэффективных межпланетных возмущений и последующая оперативная оценка их основных (ключевых) параметров, пригодных для прогнозирования. Такими ключевыми параметрами являются: направление распространения, угловые размеры, скорость фронта и транспортное время прихода межпланетных возмущений к Земле.

В принципе, на ежедневных картах индексов мерцаний, т.е. на  $m$ -картах межпланетной плазмы содержится вся пространственно-временная информация, необходимая для оценки ключевых параметров межпланетных возмущений. Однако, непосредственно на таких картах прочесть характеристики конкретных возмущений оказалось довольно сложно, а часто вообще невозможно. Это связано с одновременным присутствием разных пространственно-временных типов крупномасштабных межпланетных неоднородностей с большим разнообразием их видимых размеров, форм, скоростей и направлений движения. Здесь нас в первую очередь интересуют характеристики межпланетных возмущений вспышечного происхождения типа распространяющихся от Солнца межпланетных ударных волн. Нужен способ надежного выделения таких возмущений на фоне крупномасштабных неоднородностей других типов для оперативной оценки их основных ключевых параметров.

## Выявление межпланетных ударных волн, $\Delta m$ -карты межпланетных возмущений

При радиоастрономических наблюдениях мерцаний космических радиоисточников в условиях спокойного солнечного ветра индекс мерцаний каждого из наблюдаемых источников остается практически неизменным день ото дня. Имеет место лишь медленное изменение уровня мерцаний, связанное с годичным изменением элонгации - видимого углового расстояния источника от Солнца. При наблюдениях мерцаний радиоисточников в условиях возмущенного солнечного ветра во время пересечения луча зрения ударной волной регистрируется усиление мерцаний, вызванное увеличением плотности неоднородной плазмы на фронте волны. Для выявления таких межпланетных возмущений типа ударных волн нами строились [12] двумерные пространственные распределения величины

$$\Delta m_i = 2(m_{i,j} - m_{i,j-1}) / (m_{i,j} + m_{i,j-1}),$$

Здесь  $i$  – номер источника,  $j$  - дата наблюдений. Здесь применена нормировка на сумму индексов мерцаний этих двух соседних дней наблюдений, чтобы исключить влияние расстояния от Солнца. Коэффициент 2 взят только для того, чтобы сохранить в среднем масштабы  $\Delta m$  и  $m$ , но он может быть и совершенно произвольным.

Ясно, что величина  $\Delta m$  при этом будет реагировать на изменения межпланетной плазмы, зондируемой данным источником. В этом смысле все значения  $\Delta m$  можно разделить на три части:

- $\Delta m_i = 0$  - это означает, что состояние межпланетной плазмы не изменилось по сравнению с предыдущим днем наблюдений;
- $\Delta m_i > 0$  - мерцания усилились по сравнению с предыдущим днем. Это значит, что фронт возмущения пересекает зондируемую область межпланетной плазмы;
- $\Delta m_i < 0$  - фронт возмущения вышел из зондируемых областей межпланетной плазмы.

На карты наносились положения только тех радиоисточников, которые показали увеличение индекса мерцаний в данный день по сравнению с предыдущим днем. При этом положение фронта возмущения определялось по гладкой кривой, которая отделяет возмущенную и невозмущенную области. Ясно, что карты пространственного распределения этих значений  $\Delta m_i > 0$  выявляют распространяющиеся межпланетные возмущения, а непрерывная последовательность таких карт позволяет видеть пространственно-временную эволюцию этих возмущений. Примеры  $\Delta m$  - карт таких межпланетных ударных волн приведены на рис.5. Очевидным преимуществом таких  $\Delta m$ -карт является «самокалибровка», настройка на

распространяющиеся от Солнца возмущения типа межпланетных ударных волн вспышечного происхождения.

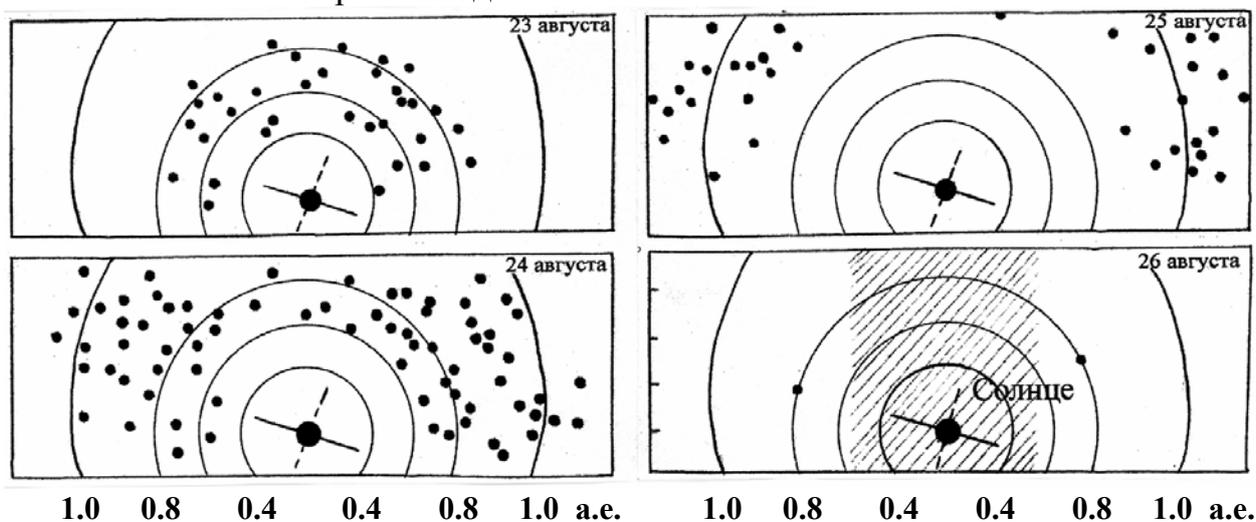


Рис.5. Пример  $\Delta m$  – карт межпланетного возмущения, распространяющегося от Солнца (23 – 26 августа 1979 года)

Это как бы метод фильтрации межпланетных возмущений разного типа. Еще более наглядно и эффективно этот метод работал бы, если бы можно было получать такие карты чаще, скажем каждый час (получать фильм с частотой, например, 12 или 24 кадров в единицу времени), а не один раз в сутки. В принципе, это вполне возможно. А пока заметим, что таким методом можно также выявлять неоднородности солнечного ветра и других типов [19], подобрав удобный для анализа временной масштаб. Заметим также, что рассмотренные здесь карты дают первое качественное, но достаточное для целей прогнозирования, представление о наличии и характере возмущения, о его ориентации и скорости распространения от Солнца, о геометрических характеристиках фронта возмущения.

### Скорость фронта межпланетных ударных волн на различных расстояниях от Солнца.

На рис.6 показаны карты межпланетной ударной волны в гелиоцентрических координатах:  $r$  - расстояние от Солнца,  $\varphi$  - гелиоширота. Скорость ударного фронта может быть оценена по пройденному пути и соответствующему интервалу времени:

$$V = \Delta r / \Delta t = (r_{j+1} - r_j) / (t_{j+1} - t_j)$$

Здесь  $r_j$  - радиус-вектор фронта волны в направлении ее распространения, т.е. радиальное расстояние от Солнца до положения фронта в день наблюдений,  $t_j$  - время регистрации фронта волны,  $j$  - дата наблюдений. Если ударная

волна отождествлена с определенной вспышкой на Солнце, то можно также оценить среднюю на соответствующем отрезке пути от Солнца скорость фронта ударной волны. В работе [12] показано, что

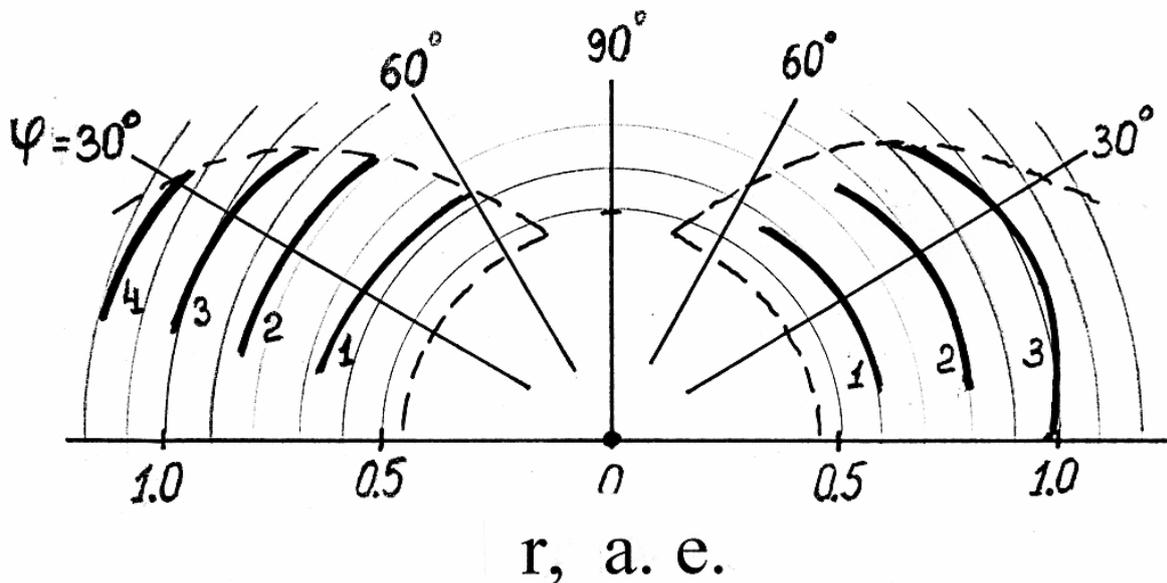


Рис.6 Пример  $\Delta t$  – карт межпланетной ударной волны,  $r$  - расстояние от Солнца (в астрономических единицах),  $\varphi$  - гелиоширота .

- скорость фронта ударной волны уменьшается с увеличением расстояния от Солнца при  $r > 0.1$  а.е.
- Темп замедления зависит от начальной величины скорости  $V_0$  ударной волны.
- Наблюдательные данные соответствуют соотношению  $dV / dr \propto V_0^2$ .

С точки зрения интересов прогнозирования знание скорости ударной волны на разных расстояниях от Солнца важно для оценки времени предсказания земных событий. На основе полученных зависимостей  $V(r)$  мы построили модельную зависимость  $T(r)$  времени распространения ударной волны от места ее обнаружения до Земли (Рис.7). Здесь  $r$  - гелиоцентрическое расстояние фронта ударной волны. Из этого рисунка видно, что максимальное время предсказания событий на Земле, связанных с приходом межпланетных ударных волн, находится в пределах 1,5 - 3 суток. Обсуждаемые наблюдения проводились на частоте 102,5 МГц. На данной частоте индекс мерцаний «чувствует» изменения состояния межпланетной плазмы, начиная с гелиоцентрических расстояний 0,4 - 0,5 а.е. Поэтому, как это видно на рис.4, практически время предсказания по нашим измерениям составляет 30 – 50 час.

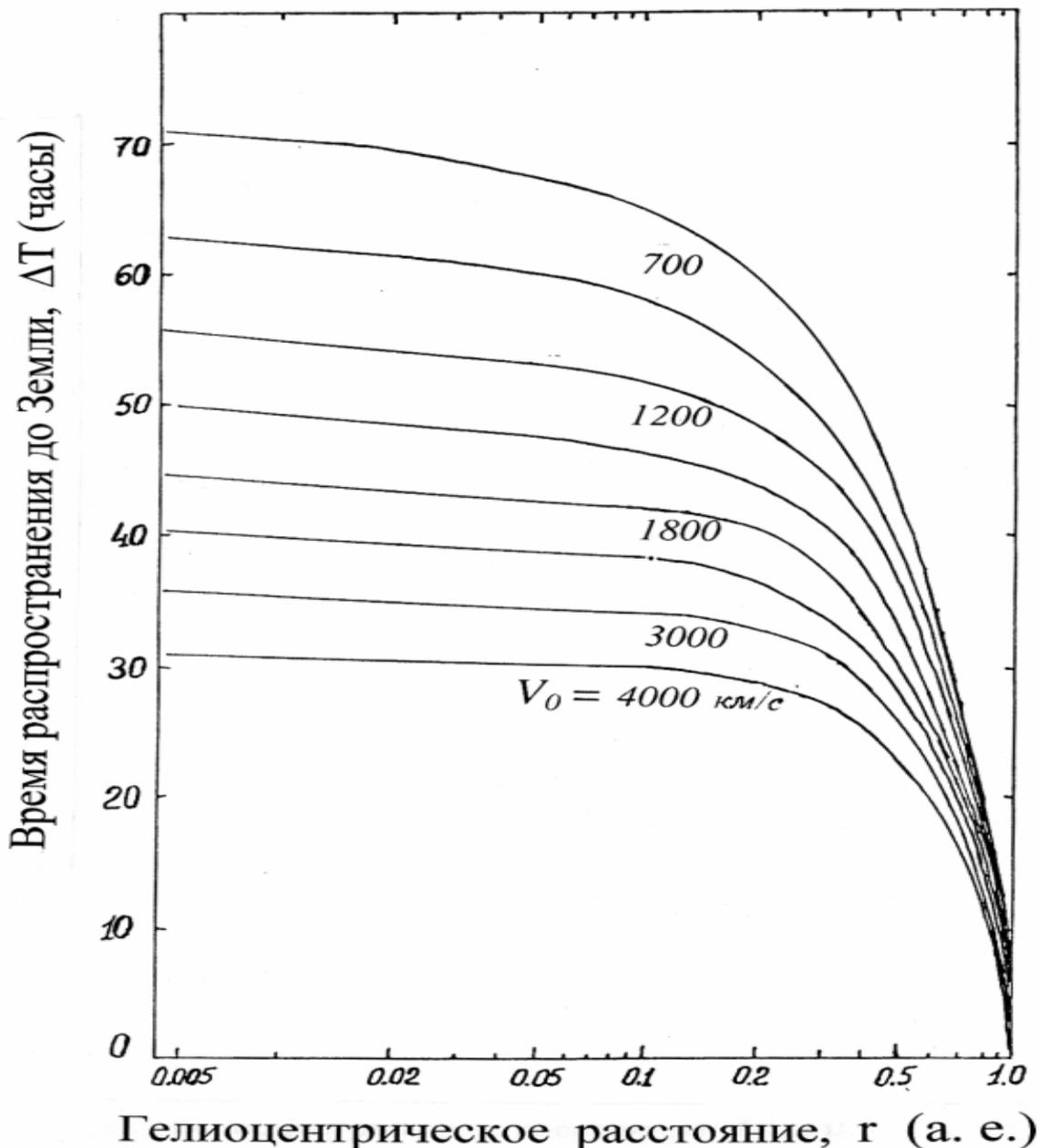


Рис.7 Зависимость от гелиоцентрического расстояния  $r$  времени предсказания  $T$ , т.е. времени распространения ударной волны от места её обнаружения до Земли ( $V_0$  – начальная скорость ударной волны).

Из этого рисунка видно, что максимальное время предсказания событий на Земле, связанных с приходом межпланетных ударных волн, находится в пределах 1,5 - 3 суток. Обсуждаемые наблюдения проводились на частоте 102,5 МГц. На данной частоте индекс мерцаний «чувствует» изменения состояния межпланетной плазмы, начиная с гелиоцентрических расстояний 0,4 - 0,5 а.е. Поэтому, как это видно на рис.7, практически время предсказания по нашим измерениям составляет 30 – 50 час.

## Геометрические параметры межпланетных ударных волн

Прежде, чем по наблюдениям оценивать время возникновения возмущения на Земле, необходимо оценить произойдет или не произойдет это событие. Иначе говоря, заденет или не заденет межпланетное возмущение Землю? Очевидно, что для этого нужно знать не только скорость распространения, но и геометрию фронта ударной волны, по крайней мере, направление ее расширения и поперечные размеры. Размеры и направление движения фронта ударной волны выявляются непосредственно по радиоизображениям (по картам  $\Delta m$ ) межпланетных возмущений. Оцененные по нашим измерениям угловые размеры (диаметр) межпланетных ударных волн в среднем составляют [19, 20]:

- в гелиоширотном сечении –  $90^{\circ}$
- в гелиодолготном сечении –  $115^{\circ}$

Это средние размеры. Однако иногда наблюдаются межпланетные возмущения как очень больших угловых размеров, так и весьма узконаправленные возмущения. Например, ударная волна от вспышки 18 Августа 1979 года имела исключительно большие угловые размеры. Она вызвала сильное геомагнитное возмущение, несмотря на то, что генерировавшая её вспышка находилась на краю за лимбом Солнца.

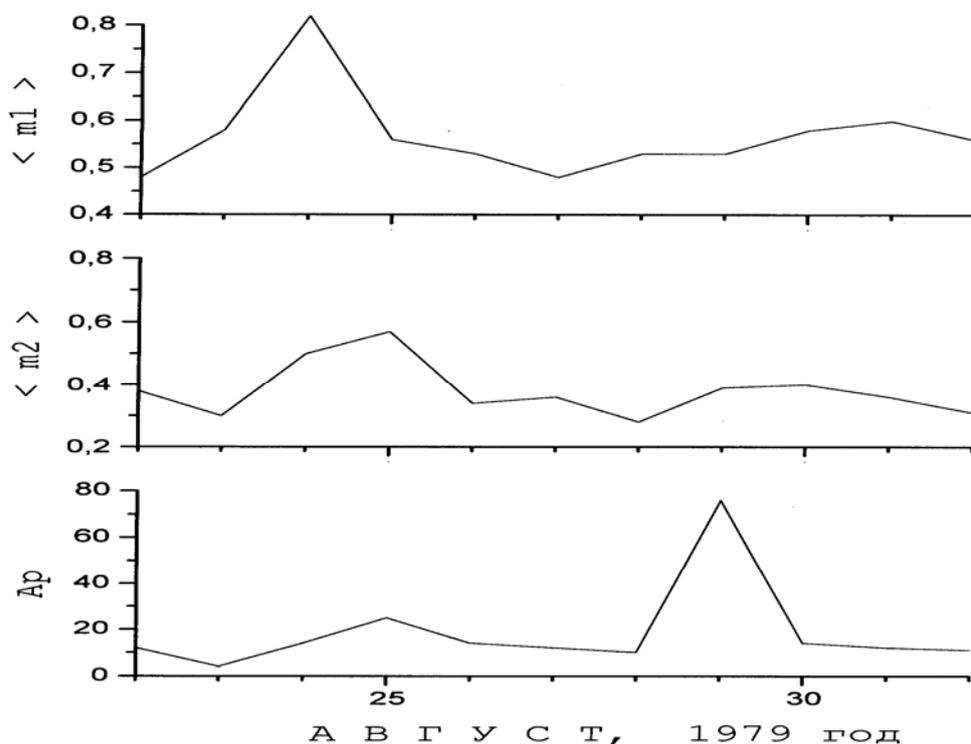


Рис.8 Зависимость индексов мерцаний  $\langle m \rangle$  и геомагнитной активности Ap от даты наблюдений.

Пример необычного узконаправленного события, наблюдавшегося единственный раз за весь период двухмесячных серий наших наблюдений с 1975 по 1985 годы, показан на рис.8. Приведен небольшой фрагмент данных из наблюдений, проводившихся в течение августа – сентября 1979 года. Здесь представлены в зависимости от даты наблюдений значения  $\langle m_1 \rangle$  и  $\langle m_2 \rangle$  - индексы мерцаний, усредненные по всем наблюдаемым источникам, просвечивающим соответственно ближние (0.5 - 0.8 а. е.) и дальние (0.8 – 1.1 а. е.) от Солнца области межпланетной среды;  $A_p$  - индекс геомагнитной активности. Видно, что в рассматриваемые дни имели место два случая усиления геомагнитной активности.

В первом случае, достаточно скромному усилению геомагнитного  $A_p$  – индекса, наблюдавшемуся 24-25 Августа, предшествовало заметное усиление в индексе межпланетных мерцаний. Можно предположить, что в это время через межпланетную среду от Солнца в направлении Земли прошло достаточно мощное крупномасштабное возмущение. Действительно, на картах пространственного распределения значений  $\Delta m_i > 0$  в эти дни выявляется межпланетная ударная волна в западном направлении от Солнца. В работе [12] она отождествляется со вспышкой балла 3В, наблюдавшейся 21 Августа 1979 года, в 6<sup>h</sup>15<sup>m</sup> UT, в северо-западном секторе диска Солнца с координатами 17<sup>o</sup>N 40<sup>o</sup>W. Оцененная при этом скорость фронта ударной волны на гелиоцентрическом расстоянии 0.87 а.е. и 0.49 а.е. составила соответственно 500 и 570 км/с. Нецентральное направление волны, невысокая скорость распространения и умеренные значения  $A_p$ -индекса говорят о том, что в данном случае ударная волна «задела» Землю лишь своей внешней областью. Это довольно типичный, часто встречающийся случай.

Совсем по иному выглядят события последующих дней. Каких либо заметных вариаций величины индекса мерцаний  $\langle m_1 \rangle$  и  $\langle m_2 \rangle$  в этот период не наблюдается. Очевидно, что прогнозирование на основании этих данных однозначно предсказало бы спокойную геомагнитную обстановку. Однако мы видим 29 Августа неожиданно резкое усиление  $A_p$  – индекса. Факт на первый взгляд необъяснимый. Вопрос, однако, проясняется при рассмотрении карт пространственного распределения значений  $\Delta m_i > 0$ , т.е. карт крупномасштабных межпланетных возмущений. Действительно, на картах в эти дни выявляется межпланетная ударная волна достаточно ограниченного углового размера  $\leq 50^o$  и направленная строго от Солнца к Земле. В работе [12] она справедливо отождествляется с яркой вспышкой балла 3В, наблюдавшейся 26 Августа 1979 года, в 16<sup>h</sup>15<sup>m</sup> UT, практически в центре диска Солнца с координатами 5<sup>o</sup>N 9<sup>o</sup>W. Заметим, что межпланетные мерцания на рабочих частотах 100 – 150 МГц наших радиотелескопов, на малых элонгациях ближе 25<sup>o</sup> от Солнца не наблюдаются из-за преобладания так называемого эффекта рассеяния, о чем кратко уже упоминалось выше.

По этой причине основная, центральная часть фронта такой узконаправленной от Солнца к Земле ударной волны не проявляется в индексах мерцаний наблюдаемых радиоисточников. На картах значений  $\Delta m_i > 0$  этих дней проявляется лишь слабая периферийная область межпланетной ударной волны, не вызывающая сильных изменений в величине индекса мерцаний. Однако на геомагнитную обстановку такая ударная волна естественно оказывает максимальное воздействие. Этот случай подтверждает, в частности, что наиболее информативными для прогнозирования по радиоастрономическим данным являются не сами по себе вариации среднего по небу индекса мерцаний, а полноценные  $\Delta m$  - карты крупномасштабных межпланетных возмущений.

Заметим, что подобная «центральная» и узконаправленная ударная волна еще меньших угловых размеров нами вообще бы осталась незамеченной. Чтобы ее обнаружить потребовалось бы зондировать близкие к Солнцу области межпланетной плазмы и, следовательно, привлекать для наблюдений радиотелескопы более высокочастотных диапазонов, возможно вплоть до миллиметровых волн. Но это стало бы почти неразрешимой проблемой, поскольку прогнозирование требует непрерывных наблюдений, а такие радиотелескопы ориентированы в основном на широкий круг научных задач. К счастью подобные ситуации чрезвычайно редки. А практика показывает, что оптимальным для целей прогнозирования является диапазон метровых волн (100-300 МГц). Поэтому в дальнейшем целесообразно ориентироваться на радиотелескоп этого диапазона.

#### **4. Возможности, вопросы и проблемы получения и применения радиоастрономических данных для прогнозирования космической погоды**

Что же препятствует реализации прогнозирования? Казалось бы, принципиальная возможность такого прогнозирования не вызывает сомнений. Напомним, что первые выводы о принципиальной возможности прогнозирования геомагнитной активности были получены в работе [1] по результатам наблюдений межпланетных мерцаний в течение 24 дней в октябре-ноябре 1975 года. Сопоставление индексов мерцаний с индексами геомагнитной активности указывало на наличие прямой зависимости между ними. Было предположено, что это может служить основой для выяснения возможности прогнозирования с помощью радиоастрономических данных влияния солнечных явлений на Землю. В дальнейшем более продолжительные серии наблюдений большого числа мерцающих источников в августе-октябре 1976 года (63 дня) и в сентябре-октябре 1977 года (51 день наблюдений) подтвердили эти первые выводы. Анализ семейства кривых изменения индексов мерцаний  $m_i(t)$  для всех наблюдавшихся источников выявил резкое возрастание в отдельные дни

индексов мерцаний многих радиоисточников. Сопоставление кривых  $m_i(t)$  с кривой изменения планетарного геомагнитного индекса  $A_p(t)$  показало, что некоторые случаи усиления мерцаний сопровождаются возрастанием  $A_p$ -индекса. Был также проведен корреляционный анализ связи между средним по всем наблюдаемым источникам индексом мерцаний и  $A_p$ -индексом. Было показано наличие высокой степени корреляции и запаздывания между  $A_p$ -индексом и средним по всей видимой области неба индексом межпланетных мерцаний [2-4]. Было показано, что:

- коэффициент взаимной корреляции между вариациями индекса мерцаний  $m$  и геомагнитного индекса  $A_p$  в различные годы достигает величины  $0,5 - 0,85$
- время запаздывания  $A_p$  относительно  $m$  составляет  $1-3$  суток для вариаций, связанных с распространяющимися возмущениями, и  $6-8$  суток для вариаций, связанных с долгоживущими, вращающимися совместно с Солнцем, высокоскоростными потоками.

Таким образом, подтверждалась возможность использования индексов межпланетных мерцаний для прогнозирования геофизических эффектов. Однако, и сопоставление кривых  $\langle m_i(t) \rangle$  и  $A_p(t)$ , и корреляционный анализ этих данных непосредственно не пригодны для практики прогнозирования. Они не несут достаточной, прежде всего пространственной, информации о ключевых параметрах геоэффективных межпланетных возмущений. И, наконец, окончательное подтверждение возможности прогнозирования геофизических возмущений по радиоастрономическим наблюдениям межпланетных мерцаний дают  $m$ -карты межпланетной плазмы, а точнее  $\Delta m$ -карты межпланетных возмущений. Как это уже отмечалось выше, оказалось, что непосредственно использовать для практики прогнозирования  $m$ -карты межпланетной плазмы сложно. Поэтому и была разработана методика выявления межпланетных ударных волн по  $\Delta m$ -картам межпланетных возмущений.

В процессе получения и использования радиоастрономических данных, естественно, возникают разнообразные вопросы, требующие соответствующего решения. Есть вопросы технические, связанные с конкретными, доступными для получения наблюдений радиотелескопами. Есть вопросы методики наблюдений, регистрации и обработки наблюдательных данных. Наконец, есть вопросы использования, практического применения полученных экспериментальных данных. Многие из таких вопросов встречались и решены в прежних наших сериях наблюдений. Опыт показывает, что все эти частные вопросы разрешимы. Разрешимы даже вопросы, связанные с внешними, объективными причинами, например, вызванные редкими нетипичными событиями в солнечном ветре. Возникнут, очевидно, новые вопросы непосредственно при реальной постановке наблюдений в целях прогнозирования

«космической погоды». Их также желательно выявить путем предварительных макетных испытаний.

Есть, однако, один общий вопрос, единственная проблема обсуждаемого прогнозирования - это проблема получения необходимых наблюдательных данных. Короче говоря, проблема - в радиотелескопе, точнее в отсутствии радиотелескопа для таких наблюдений.

## **5. Радиотелескоп**

Радиотелескоп является основным инструментом для радиоастрономических исследований. Под радиотелескопом понимается весь радиоастрономический комплекс, состоящий из антенны, радиометра и регистратора. При этом важнейшим его элементом является радиоастрономическая антенна. Имеющееся разнообразие радиотелескопов в основном определяется конструкцией радиоастрономических антенн. В метровом диапазоне волн наиболее эффективными являются так называемые многоэлементные антенные решетки с электрически управляемой диаграммой направленности. В электрическом отношении они сложнее параболических зеркальных антенн, но проще по механической конструкции и позволяют создать сколь угодно большую собирающую площадь антенны, а значит, обеспечивают высокую чувствительность радиотелескопа. Еще более ценным свойством таких антенн является принципиальная возможность создания многолучевой диаграммы направленности. Таким, в частности, является радиотелескоп метровых волн БСА (Большая Синфазная Антенна) ФИАН [14-16], построенный на основе двумерной многоэлементной синфазной антенной решетке.

### **Краткие сведения о радиотелескопе БСА ФИАН.**

В эксплуатацию радиотелескоп был введен в 1974 году. Первоначально рабочий диапазон радиотелескопа составлял  $102.5 \pm 1.5$  МГц. С начала 90-х годов этот участок частот был плотно заселен регулярным УКВ радиовещанием. Поэтому в 1999 году радиотелескоп без существенных конструктивных изменений был перестроен на частоту 111 МГц.

Антенна радиотелескопа БСА ФИАН – это плоская антенная решетка из волновых вибраторов, настроенных на волну 3 метра. Конструктивно антенна представляет собой плоский проволочный экран размером  $384 \times 187$  метров в направлении Север-Юг и Восток-Запад соответственно, над которым расположены 16384 диполя, образующих 256 рядов из 64 диполей в каждом ряду. Ряды и диполи в них ориентированы в направлении Восток – Запад.

Для формирования диаграммы направленности антенны БСА применена двухуровневая система фазирования. Все 256 рядов диполей разделены на 16 секций по 16 рядов в каждой секции. Расстояние между рядами  $d = 1.5$  м.

Первый уровень фазирования представляет собой двоичную схему фазирования рядов диполей внутри каждой секции - так называемое внутрисекционное сканирование. Здесь формируется диаграмма направленности одной секции, соответствующая ее геометрическим размерам  $24 \times 187$  м. Ширина диаграммы направленности по склонению (в Н – плоскости), определяемая линейным размером 24 м, в среднем равна  $7^\circ$ . Диаграмма направленности каждой секции управляется по склонению в пределах диаграммы одного ряда (одного диполя) посредством дискретных фазовращателей. Далее сигнал от каждой из этих секций по магистральному высокочастотному фидеру поступает на второй уровень фазирования, на так называемую матрицу Батлера, имеющую 16 входов и 16 выходов. Здесь формируется 16-ти лучевая диаграмма направленности антенны БСА. Каждому выходу фазирующей матрицы соответствует один луч – диаграмма направленности полной антенны БСА.

### **Основные требования к наблюдениям в целях прогнозирования космической погоды.**

Ясно, что для реализации обсуждаемого прогнозирования необходимы прогностические  $\Delta m$ -карты межпланетных возмущений. Главные требования к таким картам следующие:

- Карты должны быть полноразмерными. Их общий размер должен быть равен (желательно даже процентов на 20 больше) размеру функционального пространства. В нашем случае это, примерно, размер внутренней гелиосферы, 1 - 1.2 астрономическая единица в радиусе от Солнца.
- Карты должны быть ежедневными (оперативными), поскольку время развития межпланетных событий мало, составляет 1 – 3 суток.
- Масштаб карт должен позволять уверенно фиксировать положение фронта межпланетного возмущения в пределах порядка 0.1 а. е.
- И, естественно, карты должны быть надежны, без больших сомнительных и пустых мест.

Из этого следуют условия для режима наблюдений межпланетных мерцаний: ежедневно должны наблюдаться (и оперативно обрабатываться) около 150 мерцающих радиоисточников (примерно 300 источников в сутки) равномерно рассеянных по небу в пределах склонений от  $-10$  до  $+70$  градусов. Это условие диктуется в первую очередь требованием надежности  $\Delta m$ -карт, хотя радиотелескоп БСА в современном состоянии, в принципе, позволяет наблюдать, на уровне его предельной чувствительности ( $5\sigma$  от уровня аппаратных шумов и флуктуаций фонового излучения неба), порядка 10000 мерцающих источников. Не вдаваясь в подробности, заметим, что эти условия подсказаны в первую очередь опытом всех наших прежних серий наблюдений межпланетных мерцаний.

К сожалению, антенна радиотелескопа БСА в её начальном базовом исполнении не может обеспечить такой режим наблюдений. Возможен только однолучевой однопользовательский режим наблюдений и, в результате, необходимо распределение наблюдательного времени между пользователями.

Заметим, кстати, что это общая проблема пользования крупными радиотелескопами. Известно, что любая научная задача требует определенного наблюдательного времени на радиотелескопе. В этом смысле условно их можно разделить на два класса: задачи кратковременные, наблюдательное достаточное время которых исчисляется минутами и задачи долговременные, необходимое время непрерывных наблюдений которых составляет многие часы, дни, месяцы или даже годы. Причем, большинство задач второго класса не возобновляемы, информация не восстанавливается последующими наблюдениями. Такими, в частности, являются и радиоастрономические исследования солнечного ветра методом картографирования индексов мерцаний. Особенно это важно для исследований крупномасштабной, неоднородной структуры солнечного ветра. Еще в большей степени все сказанное относится к обсуждаемой здесь задаче прогнозирования космической погоды. Для ее решения необходим мониторинг межпланетной плазмы посредством надежных, длительных и непрерывных наблюдений большого числа космических радиоисточников, просвечивающих окрестности Солнца в пределах всех видимых гелиоцентрических расстояний, широт и долгот. Но ясно, что непрерывность и длительность наблюдений не оставляет места для других наблюдений и, в частности, для основного пользователя, многочисленных задач вышеназванного первого класса.

Оптимальный выход из такой ситуации – привлечение резервов имеющихся в конструкциях любых радиотелескопов. Особенно большой неиспользованный потенциал имеют радиотелескопы, построенные на основе антенн типа БСА.

### **Характерные особенности БСА как антенной решетки.**

Главной конструктивной особенностью БСА как антенной решетки является большое количество ее составных элементов (16384 диполей). Именно эта особенность антенных решеток обеспечивает формирование и неинерционное электрическое (не механическое) управление их диаграмм направленности в очень широких пределах, от – один луч и одно направление, до –  $N$  лучей и  $N$  направлений ( $N$  - число элементарных излучателей) в границах диаграммы направленности элементарного излучателя. На данный момент антенна БСА работает как одномерная решетка из 16 элементов (16 секций) и формирует соответственно 16-ти лучевую диаграмму направленности. Однако в действительности антенна БСА является двумерной решеткой и в ней, в принципе, может быть сформирована

двумерная многолучевая диаграмма направленности (256 × 64 основных лучей). Такая диаграмма направленности, в принципе, позволила бы вести наблюдения одновременно всей, видимой с Земли, части неба. Ясно, что информативность таких наблюдений возросла бы неизмеримо по сравнению с современными наблюдениями на БСА. Очевидно и то, что реализовать предельные возможности БСА (как и любой подобной антенной решетки) в современных условиях сложно. Однако, конструктивные особенности антенных решеток позволяют это делать поэтапно, соизмеряя этапы с реальными возможностями.

Наряду с многолучевой диаграммой направленности исключительные возможности для повышения эффективности работы радиотелескопа дает применение современной вычислительной техники. Радиотелескоп на основе антенной решетки очень хорошо приспособлен для внедрения полной автоматизации его работы от управления всеми операциями в процессе наблюдений до организации долговременного надежного хранения и свободного неограниченного доступа пользователей к наблюдательной информации. Современный уровень вычислительной техники и динамика его развития уже сейчас дают такую возможность.

Здесь рассмотрены два основных резерва существенного повышения эффективности радиотелескопов – непрерывные многолучевые наблюдения широкой области неба и хранение исходной, наблюдательной информации при свободном, совместном ее использовании. Можно представить, какие неограниченные возможности радиоастрономических наблюдений открывает внедрение такого режима работы радиотелескопа. Фактически любой пользователь получает возможность «вести наблюдения» не только в настоящем и будущем, но и в прошлом времени. Естественно, что и задача исследований крупномасштабной структуры солнечного ветра, и обсуждаемая здесь задача прогнозирования получают при этом полную возможность для их реализации.

Добавим, что радиотелескоп на основе многоэлементной антенной решетки, кроме названных особенностей, имеет целый ряд дополнительных практических преимуществ. В частности, такой радиотелескоп допускает модернизацию, не прекращая текущей его работы, не нарушая процесс проводимых на нем радиоастрономических наблюдений.

### **Реальные возможности использования радиотелескопа БСА для наблюдений в целях прогнозирования космической погоды.**

Вопрос о возможности свободного использования радиотелескопа БСА для различных научных задач возник одновременно с началом его функционирования. Уже первые научные наблюдения в непрерывном режиме по поиску новых пульсаров исключали возможность постановки других наблюдений. Справедливости ради заметим, что еще при обосновании

данного варианта антенны БСА отмечалось [14], что при использовании многоэлементной решетки можно получить многолучевую диаграмму направленности в телесном угле. Отмечалось также, что это, в частности, позволит значительно увеличить скорость съема информации, получать радио изображения протяженных источников, увеличить время экспозиции при слежении за источниками при проведении обзорных наблюдений и т.д. Отмечалось, наконец, что для многоэлементной решетки нет принципиальных затруднений в получении линейной или прямоугольной матрицы лучей и что системы с многолучевыми диаграммами направленности могут оказаться весьма перспективными для решения многих задач. Реально же в антенне БСА был сформирован практически одноканальный (однолучевой) режим наблюдений. Причина в том, что формирование диаграммы направленности и изменение её положения производится с помощью так называемых фазовращателей посредством переключения задержек (соответствующих отрезков кабеля) в соединительных линиях отдельных рядов и секций антенны. В результате, в каждый данный момент времени луч зрения радиотелескопа установлен в одном определенном направлении для одной конкретной наблюдательной задачи. Особенно остро потребность независимого пользования антенной БСА возникла после наших выводов о необходимости непрерывных длительных наблюдений для исследования крупномасштабных неоднородностей в солнечном ветре и возможности прогнозирования геомагнитной активности по наблюдениям межпланетных мерцаний. Позднее аналогичные требования возникли у других задач, особенно у задач длительного, обзорного характера. В результате, в 2000 году был сделан первый важный шаг по пути повышения эффективности радиотелескопа, была создана вторая диаграмму образующая схема антенны БСА [17] с управлением, независимым от первой диаграммы. В ней применена такая же, как и в первом варианте БСА, двух уровневая система фазирования, но вместо фазовращателей для формирования диаграммы направленности каждой из 16-ти секций используются унифицированные матрицы Батлера  $16 \times 16$ . В результате, формируется 16 постоянных диаграмм направленности каждой секции антенны, суммарно перекрывающие в центральном меридиане весь сектор обзора от горизонта до горизонта. Каждому выходу матрицы соответствует одна из 16-ти диаграмм направленности. К сожалению, была применена коммутационная схема подключения к этим выходам, смонтированная внутри фазирующих матриц, реализующая практически только однозадачный вариант пользования радиотелескопом.

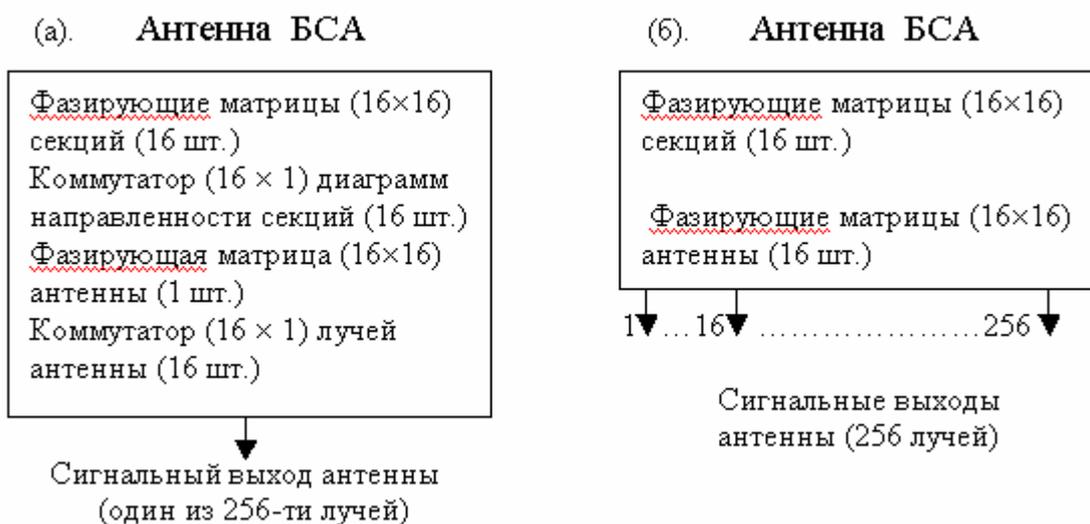


Рис. 9 (а) – существующий (одно пользовательский) вариант антенны БСА, (б) – предлагаемый (много пользовательский) вариант антенны БСА.

Поскольку и в этом варианте проведение непрерывных ежедневных наблюдений невозможно, мы предложили довести до логического завершения замысел повышения эффективности, создать на основе второй диаграмму образующей схемы антенны БСА многопользовательский многолучевой радиотелескоп. Понятие «многопользовательский» предполагает возможность одновременного пользования радиотелескопом неограниченному числу пользователей. Понятие «многолучевой» предполагает максимально возможный сектор обзора радиотелескопа. Очевидно, что для этого необходимо вместо коммутатора, выбирающего тот или иной выход матрицы (ту или иную диаграмму направленности всех секций антенны) постоянно использовать все 16 выходов от всех 16-ти секционных матриц (см. рис.9). Далее, также используя унифицированные матрицы Батлера  $16 \times 16$ , получим в пределах каждой секционной диаграммы по 16 узких диаграмм (лучей) полной антенны БСА. Таким образом, можно сформировать 256-ти лучевую в плоскости центрального меридиана диаграмму направленности антенны БСА. В результате появится возможность не только предоставить все эти 256 сигнальных выходов антенны одновременно для всех пользователей без ограничений, но и возможность создать на этой основе базовый многопользовательский радиотелескоп с долговременным хранением и свободным неограниченным доступом пользователей к полной наблюдательной информации.

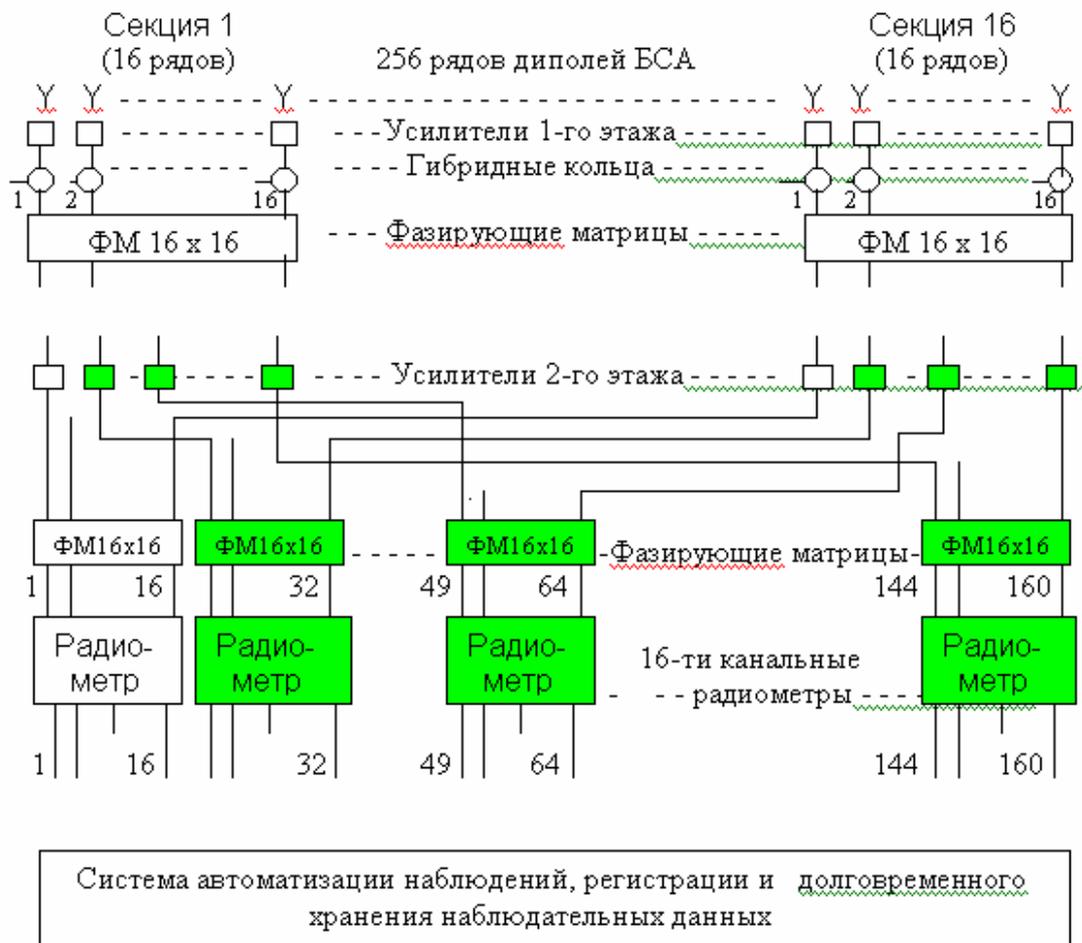


Рис.10 Структурная схема 160-ти лучевого радиотелескопа БСА для радиоастрономического мониторинга межпланетной среды

Для нашей задачи прогнозирования геомагнитной активности необходимо наблюдать мерцающие радиоисточники, рассеянные по небу в пределах склонений от  $-10$  до  $+70$  градусов. Средняя ширина диаграммы направленности каждой секции антенны на этих склонениях составляет примерно 8 градусов. Следовательно, для нашей задачи необходимо постоянно использовать 10 соответствующих диаграмм направленности. Таким образом, для наших наблюдений для перекрытия необходимого сектора обзора (80 градусов по склонению) будет достаточно иметь 160 лучей (сигнальных выходов) антенны БСА. Структурная схема 160-ти лучевого радиотелескопа БСА для радиоастрономического мониторинга межпланетной среды приведена на рис.10. Тёмным на схеме выделены узлы, которые необходимо реализовать для этого радиотелескопа.

Заметим кстати, что из сказанного вытекает естественное общее требование некоммутируемой схемы такого типа радиоастрономических антенн.

### **Макетирование, отладка и испытание системы прогнозирования (от радиотелескопа до прогноза)**

Любое новое большое дело предварительно должно быть тщательно подготовлено вплоть до рабочих макетных испытаний и отладки его рабочего образца. Для наших наблюдений межпланетных мерцаний в целях прогнозирования геофизических возмущений, в принципе, достаточно иметь упомянутые 160 сигнальных выходов антенны БСА. При некоторых допустимых ограничениях, на этой основе вполне можно сформировать специализированный радиотелескоп, обеспечивающий такие наблюдения. Однако, во всех отношениях, более правильным представляется создание многопользовательского радиотелескопа, на совместной, коллективной основе.

В 2002 году нами был создан рабочий макет базового автоматизированного радиотелескопа в 16-ти лучевом исполнении антенны БСА [18], как основа для создания многопользовательского многолучевого радиотелескопа БСА ФИАН. Разносторонние испытания макета такого радиотелескопа в режиме непрерывных (мониторинговых) наблюдений мерцающих радиоисточников показали, что заметно повышается информативность научных программ наблюдений, как в пространственном, так и временном исчислении. Кроме того, у радиотелескопа появляются большие возможности для «самоанализа», для непрерывного контроля его рабочего состояния, недоступные в режиме однолучевых наблюдений, но очень важные для практики. Продолжительное время с момента создания макет использовался в диагностических целях при различных технических работах на антенне БСА. Однако, кроме макетирования радиотелескопа, важно также получить макетные испытания всего процесса, от наблюдений до прогноза, т.е. реально проработать весь процесс прогнозирования. К сожалению, коммутационный вариант работы всей антенны допускает только однопользовательский режим наблюдений. Поэтому сейчас для таких макетных наблюдений мы используем 9 сигнальных выходов одной секции (1/16 часть) антенны. Это позволяет наблюдать радиоисточники одновременно в секторе неба от  $-5$  до  $65$  градусов по склонению. Такие макетные наблюдения сейчас ведутся в непрерывном (мониторинговом) режиме. При этом, конечно, значительно падает чувствительность и значит число наблюдаемых мерцающих радиоисточников, но появляется возможность наблюдений практически всей необходимой области неба. Чувствительность постепенно можно будет повышать путем суммирования по интенсивности низкочастотных выходных сигналов отдельных секций, не

изменяя при этом их диаграмм направленности. Пробная проверка суммирования сигналов от двух секций в одной диаграмме направленности строго подтвердила расчетное увеличение чувствительности и реальное уменьшение влияния радиопомех. Такие макетные наблюдения позволяют, в частности, оценить степень надежности получения  $\Delta m$ -карт межпланетных возмущений под влиянием наземных радиопомех, солнечных шумовых бурь, ионосферных мерцаний, погодных условий и т.д. Кроме того, это позволит отладить методику получения и форму представления прогностической информации. И, наконец, мы рассчитываем на основе таких макетных наблюдений, не ожидая реализации варианта полномасштабного многопользовательского радиотелескопа, начать пробное прогнозирование геофизической активности уже в начале выхода из фазы текущего минимума солнечной активности.

### **Заключение**

На основе многолетнего опыта наблюдений мерцаний большого числа космических радиоисточников, учитывая упомянутые вопросы и проблемы, мы можем утверждать, что радиоастрономический метод картографирования межпланетной плазмы наряду с другими методами может быть эффективно использован для прогнозирования «космической погоды». Основными радиоастрономическими данными для такого прогнозирования являются  $\Delta m$ -карты межпланетных возмущений. При этом ключевыми являются параметры крупномасштабных возмущений, выявляемые на  $\Delta m$ -картах:

- угловые размеры межпланетных возмущений
- направление их распространения
- скорость фронта
- транспортное время прихода к Земле

Основным требованием для получения  $\Delta m$ -карт является возможность непрерывных наблюдений межпланетных мерцаний по всему небу от  $-10$  до  $+70$  (для наших широт) градусов по склонению. Главным на сегодняшний день и, по-видимому, единственным препятствием для постановки такого прогнозирования является отсутствие радиотелескопа для проведения необходимых наблюдений. Наиболее эффективным для таких наблюдений и одновременно совместимым с потребностями других научных задач является многолучевой радиотелескоп на основе антенной решетки метрового диапазона волн. Радиотелескоп БСА ФИАН в принципе хорошо отвечает таким требованиям, поэтому сейчас принимаются усилия по его технической модернизации в этих целях и, в целом, для повышения эффективности его использования.

## Литература

1. Власов В.И., Радиоизображения межпланетной турбулентной плазмы // Астрон. журнал, 1979, Т. 56, №1, с. 96
2. В.И. Власов, О возможности прогнозирования геофизической активности по межпланетным мерцаниям радиоисточников// Геомагнетизм и аэрномия, 1981, Т.21, №3, с.441-444
3. В.И. Власов, Корреляционный анализ вариаций индексов межпланетных мерцаний // Геомагнетизм и Аэрномия, 1982, Т.22, №4, с.536-542
4. В.И. Власов, В.И. Шишов, Т.Д. Шишова, Связь между вариациями индекса геомагнитной активности и параметров межпланетных мерцаний // Геомагнетизм и аэрномия, 1985, Т.25, №2, с.254-258
5. Hewish A. and P.J. Duffett-Smith, A new method of forecasting geomagnetic activity and proton showers, Planet. Space Sci., 1987, V.35, p.487-491
6. В.И. Власов, И.В. Чашей, В.И. Шишов, Т.Д. Шишова, Межпланетная плазма по радиоастрономическим данным // Геомагнетизм и аэрномия, 1979, Т.19, № 3, с.401-424
7. B.L. Gotwols, D.G. Mitchell, E.C. Roelof, W.M. Cronin, S.D. Shawhan, W.C. Erickson, (Нормированный индекс мерцаний, полученный по 46 мерцающим источникам на 34.3 МГц)// J. Geophys. Res., 1978, V.83, A9, p.4200-4206
8. J.W.Armstrong, W.A.Coles, Interplanetary scintillations of PSR 0531+21 at 74 MHz// Astrophys. J., 1978, V.220, p.346-352
9. Cohen M.H., Gunderman E.J., Harris D.E., New limits in the diameters of radio sources// Astrophis. Journal, 1967, V.150, p.767-783
10. В.И. Власов, В.И. Шишов, Т.Д. Шишова, О крупномасштабной структуре межпланетной плазмы // Письма в Астрон. журнал, 1976, Т. 2, №5, с. 248-250
11. В.И. Власов, Карты межпланетной плазмы по наблюдениям в Августе-Октябре 1979 года // Препринт ФИАН, 1980, №114, с.1-20
12. В.И. Власов, Скорость межпланетных ударных волн по радиоастрономическим данным // Геомагнетизм и Аэрномия, 1988, Т.28, №1, с.1-8
13. V.V. Vitkevitch, Scattering and scintillations of discrete radio sources as a measure of the interplanetary plasma irregularities // Solar-Terrestrial Symposium, D. Reidel, Dortrecht, 1971, p.49-66
14. В.В. Виткевич, Ю.П. Илясов, С.М. Кутузов, Радиотелескоп метрового диапазона волн с заполненной апертурой, Известия ВУЗ, РАДИОФИЗИКА, 1973, Т.16, №12, 1904-1908
15. С.М. Кутузов, Ю.П. Илясов, А.А. Глушаев, Антенные системы радиотелескопа БСА ФИАН, Известия ВУЗ, РАДИОФИЗИКА, 1976, Т.19, №11, С. 1607-1613

16. В.В. Виткевич и др., Известия ВУЗ, РАДИОФИЗИКА, 1976, Т.19, С.1594
17. Ю.И. Азаренков, Р.Д. Дагкесаманский, С.М. Кутузов и др., Вторая многолучевая диаграмма направленности на радиотелескопе БСА ФИАН, Всероссийская астрономическая конференция, Тез. докл., СПб.: НИИХ СПбГУ, 2001 г., стр. 6.
18. В.И. Власов, В.Н. Алексеев, Е.И. Исаев, Б.И. Иванов, К.А. Лапаев, С.В. Логвиненко, А.Г. Соин, БАРТм16-БСА (Базовый автоматизированный радиотелескоп многопользовательский на основе 16-ти лучевой диаграммы антенны БСА – рабочий макет) // Препринт ФИАН, 2002, №31, с.1-28
19. Власов В. И., Шишов В. И., Извеков Б. К., Исаев Е. А., Кутузов С. М., Соин А. Г., Азаренков Ю. И., Иванов Б. И., Костромин В. И., Мазурин И. Г., Соломин Н. С., Суринов С. П., Крупномасштабные возмущения в межпланетной плазме: метод исследования, аппаратура, результаты // Труды ФИАН, 2002, Т.229, с.185-216.
20. В.И. Власов, В.И. Шишов, Т.Д. Шишова, Структура распространяющихся возмущений межпланетной плазмы // Геомагнетизм и аэрномия, 1985, Т.24, №4, с.541-545