

3.3.1. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНЫХ ДАННЫХ НЦ ОМЗ (ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПРИБОРА «MODIS» КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «TERRA»)

Рассматриваются основные элементы информационной системы космических данных ДЗЗ, разрабатываемой и создаваемой в НЦ ОМЗ при участии ФИРЭ РАН. Рассмотрена работа подсистем хранения информации и доступа к данным на примере информации прибора «MODIS» космического аппарата «TERRA».

Введение

Большие объемы информации, получаемые в настоящее время с помощью средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, диктуют необходимость создания адекватных информационных систем для обработки, каталогизации и архивации поступающей информации и результатов обработки экспериментальных данных. Данные, накапливаемые в информационной системе, могут использоваться для решения как оперативных, так и фундаментальных научных и прикладных народнохозяйственных задач [1–3].

Одними из основных элементов информационной системы (ИС) данных ДЗЗ являются подсистемы хранения информации и доступа к данным. Эти подсистемы должны обеспечивать необходимый уровень надежности хранения данных и эффективность доступа пользователей к соответствующим данным. Как правило, информационные системы ориентируются на конечного пользователя. Поэтому информационная система должна обладать простым, удобным, легко осваиваемым интерфейсом, который обеспечивает пользователю выполнение всех необходимых для его работы функций, и в то же время, исключает возможность выполнения пользователем каких-либо несанкционированных действий.

Информация, получаемая с космических средств ДЗЗ, накапливается и хранится в центрах обработки и хранения космической информации, в том числе и в специализированных (тематических) центрах обработки и хранения космической информации. В настоящее время существуют отечественные специализированные центры: <http://smis.iki.rssi.ru/archive/> — ИКИ РАН; <http://ire.rssi.ru/cpssi> — ЦОХКИ ИРЭ РАН, г. Фрязино; http://sputnik.infospace.ru/catalog_rus.html — НИЦ «Планета»; <http://ckm.iszf.irk.ru/satdata> — региональный центр ИСЗФ РАН г. Иркутск и др., информация в которых имеет, как правило, тематическую направленность.

Неотъемлемым элементом центров обработки и хранения космической информации является информационная система, включающая современные компьютерные и программные средства для надежного длительного хранения данных, а также соответствующие графические интерфейсы, позволяющие осуществить запрос и получение необходимой информации [2, 4].

Одним из центров обработки и хранения космической информации является центр приема, обработки, хранения и распределения данных в

Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) Центра космических наблюдений Роскосмоса. Создаваемая в НЦ ОМЗ информационная система направлена на обеспечение решения ряда общесистемных задач, относящихся к компетенции Федерального центра ДЗЗ, и, в частности, ведение Государственного фонда (архива) данных ДЗЗ и предоставление потребителям возможности поиска и получения необходимой информации [5].

В настоящем сообщении основное внимание уделено описанию работы информационной системы НЦ ОМЗ по обработке, каталогизации и архивации в оперативном режиме данных прибора «MODIS», установленного на американском космическом аппарате «TERRA». Космический аппарат «TERRA» — это полярно-орбитальный спутник с периодом обращения около 100 мин., который был запущен 18 декабря 1999 г. Прибор «MODIS» — сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения, имеющий 36 спектральных каналов в диапазоне длин волн от 0,4 до 14,4 мкм (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Краткое описание информационной системы НЦ ОМЗ

Информационная система НЦ ОМЗ включает в себя следующие функциональные подсистемы:

- прием спутниковых данных, их архивирование в оперативном архиве;
- обработку данных до уровня 1Б¹ (восстановленные данные приборов с радиометрической коррекцией и географической привязкой, полным разрешением, наличием меток времени и аннотацией, вспомогательной информацией);
- каталогизацию информации в разработанной для этих целей базе данных (БД);
- создание долговременного архива на магнитных лентах типа DLT;
- создание системы обмена данными через Интернет.

Инфраструктура ИС состоит из совокупности каталогов архивов космической информации и программно-аппаратных средств обмена каталожной и сопутствующей информацией. Инфраструктура ИС позволяет в рамках единой системы проводить общий и детальный поиск данных, а также оформлять заказы на их получение.

В настоящее время в НЦ ОМЗ имеются архив и электронный каталог данных, полученных и получаемых с отечественных и зарубежных космических систем ДЗЗ. Имеется возможность удаленного доступа к каталогу по каналам связи и через Интернет. Завершается создание комплекса программно-аппаратных средств инфраструктуры по поддержке архива долговременного хранения данных и электронного каталога.

¹ Для определения уровня представления данных использована система обозначений, предложенная в рамках программы создания Информационной системы данных по наблюдениям Земли (EOSDIS) и поддерживаемая рекомендациями Комитета по спутникам для наблюдения Земли (CEOS) (<http://wgiss.ceos.org/ceos.htm>).

Информация с космического аппарата «TERRA» принимается в НЦ ОМЗ в режиме непосредственной передачи и архивируется в оперативном архиве. Экспериментальные данные представляют собой файлы в формате pds (product data set). Для обработки этих данных используется программный пакет IMAPP (International MODIS/AIRS Processing Package), разработанный в Висконсинском университете при поддержке NASA и представляющий собой вариант программного обеспечения, применяемого для обработки данных прибора «MODIS». Он осуществляет преобразование данных из файлов формата уровня 0 (исходные данные) в стандартизованные в рамках программы EOS (Earth Observation System) продукты уровней 1А и 1Б. Это преобразование включает в себя операции по переформатированию данных, их географической привязке и калибровке.

Программные компоненты информационной системы НЦ ОМЗ

Для управления базой данных информационной системы НЦ ОМЗ используется СУБД Oracle.

В разработанной БД выделены два раздела. Первый раздел используется для хранения описаний наборов данных (коллекций) космических наблюдений, второй раздел — для хранения детальных описаний отдельных единиц хранения данных (гранул).

Для обработки, каталогизации и архивации данных в оперативном и автоматизированном режиме было разработано специальное программное обеспечение (ПО), включающее в себя:

1. ПО обмена данными:

- ftpx — пакетная перекачка данных с сервера оперативного архива в буфера системы обработки данных и их подготовки к архивированию;
- ftpput — пакетная перекачка данных из системы обработки данных на сервер оперативного архива.

2. ПО регистрации спутниковых данных, поступающих в систему обработки.

3. ПО каталогизации спутниковых данных, поступающих в долговременный архив.

4. ПО подготовки архивных копий наборов данных и переноса их на магнитные носители (типа DLT).

Программное обеспечение 2–4, а также программное обеспечение IMAPP объединены одной управляющей программой MODIS_OMZ.pl.

Программные средства, обеспечивающие функционирование системы запроса данных (СЗД), установлены на web-сервере НЦ ОМЗ (http://sun.ntsomz.ru/data_new) и являются неотъемлемой составной частью информационной системы НЦ ОМЗ (<http://www.ntsomz.ru>).

Система запроса данных в информационной системе НЦ ОМЗ

Приоритетным требованием пользователей к информационным системам является снижение временных затрат на поиск и получение

целевой информации (данных). Необходимым условием выполнения этого требования применительно к системе космических данных является организация поиска данных одновременно по всем коллекциям данных, включенным в систему. Для этого в системе запроса данных созданы специальные пользовательские интерфейсы (шлюзы доступа) к описаниям хранимых в архивах системы данных. Преимуществом этих интерфейсов является то, что они позволяют организовать процесс поиска, ознакомления с описаниями и графическими примитивами данных, а также оформление заказа на передачу данных в рамках единого графического интерфейса. Существенным преимуществом СЗД в целом является то, что пользователь через системный интерфейс получает актуальную информацию о хранимых в архиве данных. В обеспечение этого пользовательские интерфейсы СЗД организуют доступ непосредственно к каталогам архива космических данных, содержание которых синхронизовано с составом описываемых архивов. Кроме того, система поиска информации в СЗД организована таким образом, что еще на этапе формирования запроса исключена возможность создания противоречивого запроса.

Для детального поиска необходимо задать следующие атрибуты:

- **географический район** — координаты границ участка, описываемые прямоугольником с заданными западной и восточной долготами ($\pm 180^\circ$) и северной и южной широтами ($\pm 90^\circ$), в котором проводились измерения;
- **интервал времени** — начальные и конечные дата и время, определяющие интервал проведения измерений.
- **проект** — имя проекта (научной программы или миссии), в рамках которой проведены измерения, результаты которых размещены в грануле (значения атрибута выбираются пользователем с помощью рор-уп меню из предлагаемого системой ограниченного списка);
- **прибор** — имя прибора (научного инструмента), данные измерений которого помещены в гранулу (значения атрибута выбираются пользователем с помощью рор-уп меню из предлагаемого системой ограниченного списка);

В результате поиска пользователь, в первую очередь, получает список наборов данных (коллекций), гранулы которых удовлетворяют заданным критериям поиска.

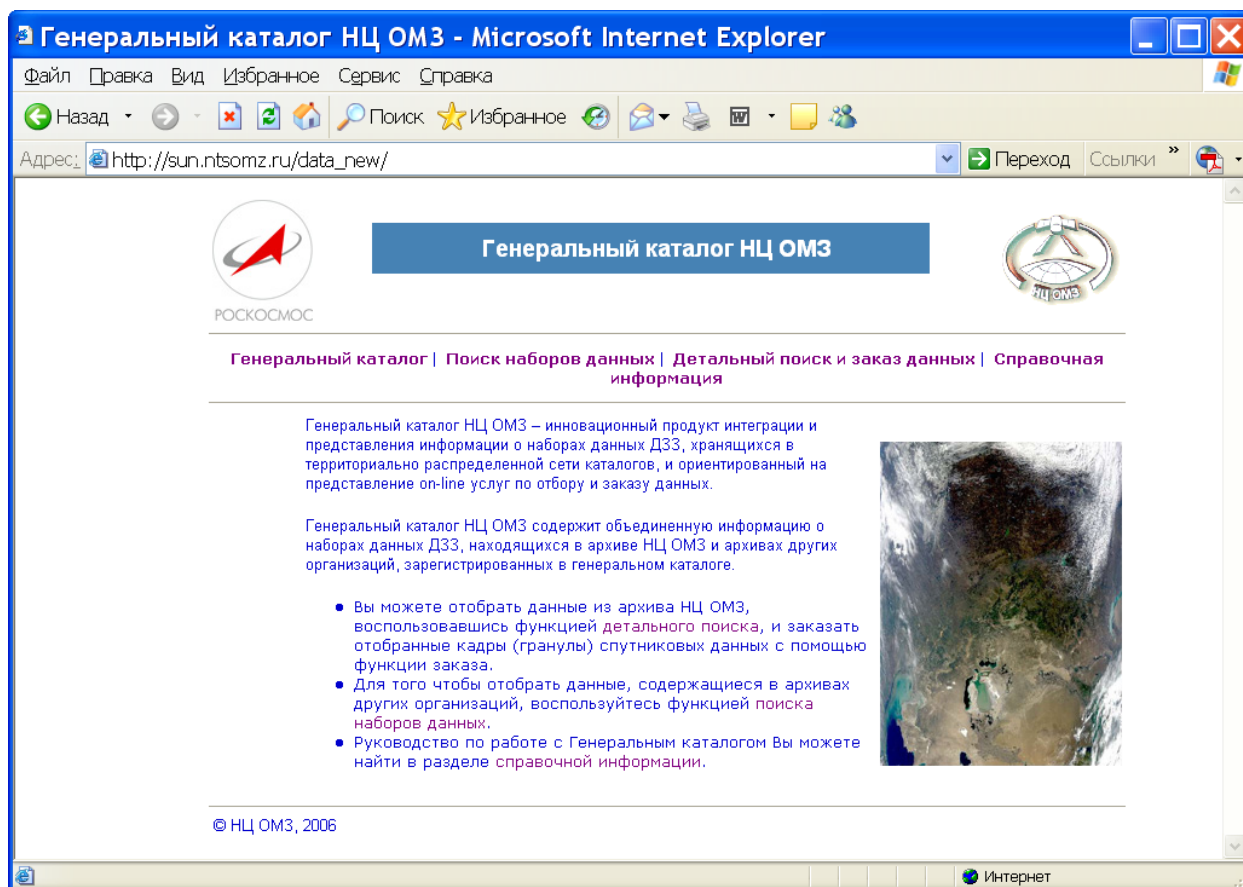
Каждая из гранул полученного при детальном поиске списка снабжена, так называемым, просмотрным изображением (browse images (NASA), или quicklook (ESA)). Оно предназначено, прежде всего, для визуальной оценки качества архивной информации как по условиям наблюдений (например, освещенности и наличию облачности), так и по наличию дефектов и искажений, возникающих при приеме и обработке данных. Интерфейс пользователя СЗД обеспечивает возможность просмотра этих изображений и дополнительной селекции списка гранул по результатам визуальной оценки их качества.

Наряду с поиском и предварительной визуальной оценкой качества данных, интерфейсы СЗД позволяют оформить заказ на выбранные данные, размещенные в архиве информационной системы, непосредственно после завершения поиска в рамках одной и той же сессии работы с интерфейсом СЗД.

Оформление заказа включает в себя две процедуры:

- 1) выбор формы передачи данных;
- 2) регистрацию контактной информации о заказчике.

При выборе формы передачи данных пользователь должен иметь возможность выбрать тип носителя, на котором передаются данные, а также указать предпочтительный формат, используемый при записи данных на выбранные носители. Оформленный заказ пересылается в архив данных. Одновременно пользователю по электронной почте пересылается запрос на подтверждение заказа. Как правило, заказ начинает исполняться архивом только после получения подтверждения непосредственно от заказчика данных.



Система поиска и запроса данных разработана с использованием свободно распространяемых программ и библиотек для операционной среды Solaris. Основу системы поиска и запроса данных составляет web-сервер Apache с модулем PHP. Модуль PHP позволяет гибко формировать формы запросов, формы представления результатов и содержит встроенные средства доступа к базе данных Oracle. Кроме того, он позволяет использовать

графическую библиотеку для динамической генерации изображений, нанесения на них заданных контуров (многоугольник, эллипс и др.) и текстовой информации. Указанные программы и библиотеки существуют и для других платформ, таких как Windows и Linux. При необходимости разработанные программы могут быть перенесены на другие платформы с минимальными затратами, связанными, в основном, с конфигурированием соответствующих программ.

Общий вид страницы доступа к интерфейсу представлен на рисунке.

3.3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА МЕТОДОМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

В результате статистической обработки и анализа данных экспериментов по радиозондированию околосолнечной плазмы, проведенных с 1991 по 2002 г. с помощью космических аппаратов GALILEO и ULYSSES, получены новые данные о свойствах солнечного ветра в диапазоне гелиоцентрических расстояний от 6 до 80 солнечных радиусов для экваториальных и полярных районов и различных фаз 11-летнего цикла солнечной активности [1–18].

1. Впервые получены оценки внешнего масштаба турбулентности плазмы солнечного ветра [1–3]. Показано, что внешний масштаб возрастает с увеличением гелиоцентрического расстояния по закону, близкому к линейному, и на дистанции около 6 солнечных радиусов от фотосферы составляет $0,7 \cdot 10^6$ км в экваториальной области. В полярных районах внешний масштаб турбулентности в 2-3 раза больше [3]. Развита модель турбулентности околосолнечной плазмы, согласно которой внешний масштаб определяется конкуренцией между линейным усилением альвеновских волн и нелинейной перекачкой турбулентной энергии в высокочастотную область спектра. Показано, что основным процессом, обеспечивающим формирование инерционного интервала спектра турбулентности солнечного ветра, являются трехволновые распадные взаимодействия с участием альвеновских волн и магнитного звука, ответственного за флуктуации плотности солнечного ветра и модуляцию просвечивающих радиосигналов [1].

2. Установлено фундаментальное свойство солнечного ветра – режим турбулентности и истечения плазмы на низких гелиоширотах практически не изменяется с циклом солнечной активности [6, 10, 11, 13, 16, 17]. Неизменность формы спектров турбулентности на низких широтах может быть объяснена устойчивостью экваториальных магнитных полей Солнца в отличие от сильно изменяющихся во времени магнитных полей полярных областей Солнца. Из анализа временных энергетических спектров флуктуаций частоты просвечивающих сигналов следует, что показатель степени трехмерного пространственного спектра электронной концентрации солнечного ветра, генерируемого низкоширотными областями короны,

находится в пределах 3,1...3,2 в области формирования и начального ускорения на гелиоцентрических расстояниях менее 10 солнечных радиусов [6, 10, 11, 13, 16, 17]. На предельно малых гелиоцентрических расстояниях (около 6 солнечных радиусов) временные спектры флуктуаций частоты имеют резкий обрыв спектральной плотности на частотах, превосходящих 0,04–0,06 Гц, соответствующие пространственные масштабы неоднородностей не превышают 1500...2500 км [6]. При переходе в область установившегося течения (гелиоцентрические расстояния более 20 солнечных радиусов) временные частотные спектры становятся более крутыми, а спектральный индекс трехмерного пространственного спектра возрастает до 3,5...3,7 [6, 10, 11, 13, 16, 17]. Особенности радиальной эволюции спектров турбулентности получают объяснение в рамках физической модели турбулентности, представляющей выносимый потоком плазмы ансамбль взаимодействующих альвеновских и магнитозвуковых волн. При этом смена режима турбулентности обусловлена изменением относительного вклада медленного и быстрого магнитного звука: в области формирования и ускорения солнечного ветра во флуктуациях плотности преобладают медленные магнитозвуковые волны и каскадные процессы отсутствуют, а в области установившегося течения основной вклад связан с быстрым магнитным звуком и энергетические спектры турбулентности формируются за счет каскадирования энергии в сторону мелких масштабов [13].

3. Показано, что непрерывные наблюдения за сигналом движущихся за Солнцем космических аппаратов и регистрация частоты этих сигналов на нескольких наземных пунктах предоставляет возможность получения данных о генерации на Солнце плазменных возмущений типа корональных выбросов масс, транзиентов, ударных волн и других образований. Спектральный и корреляционный анализ флуктуаций частоты показал, что метод радиозондирования может обеспечить детектирование распространяющихся от Солнца плазменных потоков, исследовать их характеристики и прогнозировать экстремальные события в околоземном пространстве до их наступления. Детектирование плазменных возмущений на трассе распространения радиоволн КА – наземный пункт может быть осуществлено по возрастанию интенсивности частотных флуктуаций, а также по поведению их временного спектра и кросс-корреляционной функции флуктуаций частоты, наблюдаемых одновременно на двух разнесенных на большое расстояние наземных пунктах. При увеличении интенсивности флуктуаций, обусловленном крупномасштабными плазменными образованиями, заметно возрастает спектральный индекс временных энергетических спектров частотных флуктуаций, наблюдается уменьшение ширины кросс-корреляционной функции и изменение положения ее максимума на временной оси, что свидетельствует об отличии характеристик солнечного ветра при спокойных и возмущенных состояниях. Это касается пространственного спектра турбулентности плазмы, скорости истечения и разброса скоростей неоднородностей. Обнаружение плазменных возмущений

методом радиозондирования происходит раньше на несколько суток по сравнению со временем отклика околоземной плазмы [15].

4. Проведен спектральный анализ данных о низкочастотных флуктуациях амплитуды радиосигналов, излучавшихся одновременно на двух частотах (8,4 и 2,3 ГГц) [9, 18]. По зависимости спектральной плотности флуктуаций от гелиоцентрического расстояния определены положения областей перехода флуктуаций из режима слабых мерцаний в режим насыщения. Переход происходит на гелиоцентрическом расстоянии от 16 солнечных радиусов для частоты 2,3 ГГц и около 7 радиусов для частоты 8,4 ГГц. Кросскорреляция между флуктуациями на двух частотах обнаруживает наличие временного запаздывания, связанного с обусловленным рефракцией в неоднородной плазме солнечного ветра пространственным разнесением лучей. По временному запаздыванию флуктуаций получены оценки скорости движения неоднородностей, значения которой на гелиоцентрических расстояниях менее 10 радиусов Солнца не превосходят 80...100 км/с.

5. Выполнен кросскорреляционный анализ материалов радиозондирования околосолнечной плазмы, в которых флуктуации частоты дециметрового сигнала измерялись одновременно в двух разнесенных на большое расстояние наземных пунктах [16]. Для гелиоцентрических расстояний 20...40 солнечных радиусов обнаружено регулярное существование двухскоростной структуры солнечного ветра, которая проявляется в наличии у кросскорреляционной функции двух четко выраженных максимумов. Наблюдаемая картина соответствует одновременному присутствию неоднородностей, движущихся с двумя различными скоростями. Развита модель, в которой модулирующие неоднородности связаны с генерируемыми локально медленными магнитозвуковыми волнами, распространяющимися от Солнца и к Солнцу относительно движущейся плазмы солнечного ветра. Скорость движения неоднородностей относительно луча зрения может равняться сумме и (или) разности скоростей солнечного ветра и скорости звука. Полученный результат открывает возможность (при больших объемах экспериментальных данных) оценок по данным разнесенных наблюдений скорости медленного магнитного звука и температуры плазмы.

6. Разработана новая методика оценки внешнего масштаба турбулентности солнечного ветра, основанная на эффекте усиления флуктуаций частоты радиоволн при двукратном распространении в неоднородной плазме [7, 12]. Показано, что эффект усиления регистрируется в сеансах связи с заходящими за Солнце космическими аппаратами (КА) только в тех случаях, когда КА (ретранслятор сигналов) находится на малых расстояниях от рассеивающего слоя неоднородностей околосолнечной плазмы, так что время распространения радиоволн от этого слоя до КА и обратно существенно меньше, чем время смены неоднородностей, пересекающих трассу распространения радиоволн. Это время определяется скоростью движения неоднородностей и наибольшими размерами (внешним

масштабом турбулентности). Найденные по этой методике значения внешнего масштаба турбулентности согласуются с величинами, полученными с использованием другой развитой в ИРЭ РАН методики, основанной на спектральном анализе долговременных массивов флуктуаций частоты зондирующих плазму сигналов.

3.3.3. РАЗВИТИЕ РАДИОЗАТМЕННОГО МЕТОДА ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ТРАССАХ СПУТНИК – СПУТНИК

Развит радиоголографический метод определения параметров атмосферы и ионосферы на затменных трассах спутник-спутник при заходе низкоорбитального спутника в земную тень по отношению к навигационному спутнику [1–15]. Радиоголографический метод на порядок величины повышает вертикальное разрешение при восстановлении высотных профилей температуры, плотности и давления в атмосфере и электронной концентрации в ионосфере [1, 2, 8,]. Для обращения радиоголограмм, содержащих измерения амплитуды и фазы сигнала на трассе спутник-спутник, предложен обобщенный интегральный оператор, который позволяет восстанавливать поля в пространстве между передающим и принимающим спутником [1, 2].

Радиоголографический метод позволяет определить вертикальные градиенты коэффициента преломления и осуществить мониторинг волновых структур в атмосфере на высотах от 10 до 40 км в глобальном масштабе [3–7]. Показано, что вариации амплитуды сигналов можно рассматривать как радиоголографическое изображение волновых структур в атмосфере [2–4, 6–14]. По изменениям амплитуды сигналов при радиозатмениях, осуществленных с помощью германского спутника CHAMP, найдены волновые структуры с вертикальными периодами от 0,8 до 4 км в тропосфере и в нижней стратосфере на высотах 15–24 км в низких широтах и на высотах 10–15 км в средних широтах. В случае внутренних гравитационных волн по амплитудным вариациям затменного сигнала можно получить портрет гравитационной волны, содержащий высотные зависимости фазы, амплитуды и вертикальной пространственной частоты гравитационной волны. Дисперсионные и поляризационные соотношения для гравитационной волны позволяют определить высотные профили возмущений горизонтального ветра, их градиента и собственной фазовой скорости гравитационной волны. [2–4, 6, 9–11, 13].

Проведены экспериментальные исследования атмосферных флуктуаций амплитуды и фазы сантиметровых и дециметровых радиоволн в разных районах земли на затменных трассах спутник-спутник. Получены зависимости спектров и дисперсии флуктуаций амплитуды и фазы радиоволн от высоты лучевой линии. Определены высотные зависимости спектрального индекса p пространственного спектра флуктуаций индекса рефракции.

Показано, что в тропосфере на высотах 4–8 км в 70 % сеансов измерений значение $p = 3,5$, что хорошо соответствует теоретическому значению для развитой турбулентности. Определен внешний масштаб тропосферной турбулентности $\Lambda_{max} = 1,4$ км. Отмечено, что в стратосфере на высотах 14–20 км значение $p = 4,4$, т. е. неоднородности обусловлены не турбулентностью, а нерегулярными слоистыми структурами, и только в 20 % случаев спектральный индекс p соответствует развитой турбулентности. Показано, что радиозатменный метод эффективен для глобального мониторинга мелкомасштабных неоднородностей атмосферы [16–19].

Анализ радиозатменных измерений в нижней ионосфере показал наличие связи географического и сезонного распределений случаев с сильными вариациями амплитуды и фазы затменного сигнала с солнечной активностью. Таким образом, показана перспективность радиозатменного метода для изучения взаимосвязей между солнечной активностью и процессами в ионосфере и мезосфере и глобального мониторинга неоднородностей ионосферной плазмы [14, 15, 20].

Осуществлено экспериментальное исследование поглощения сантиметровых радиоволн парами воды и облаками и показана перспективность мониторинга высотных распределений паров воды и облаков радиозатменным методом [21].

Задачи и результаты мониторинга сред и космической радиофизики обобщены в монографиях [22, 23].