

УДК 550.388.2

**РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА  
В КАЗАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ**

*О.И. Белькович, А.В. Карпов, А.М. Насыров, В.В. Сидоров,  
Г.М. Тептин, А.Н. Фазрутдинова, О.Н. Шерстюков*

**Аннотация**

В данной работе представлены некоторые результаты исследований околоземного космического пространства, включая нижнюю атмосферу, нижнюю верхнюю мезосферу – нижнюю термосферу и ионосферу, которые были получены в Казанском государственном университете радиофизическими методами за последние годы. Также рассматриваются вопросы влияния параметров нижней и средней атмосферы на распространение радиоволн.

В 50-х годах XX в. И.М. Романов и К.В. Костылев создали новое научное направление – теоретические и экспериментальные исследования многофункциональных радиосистем с учетом среды распространения. В настоящее время сформировалась радиофизическая школа, в рамках которой проводятся научные исследования по следующим направлениям: физика метеорных явлений и метеорное распространение радиоволн; физика атмосферы и ионосферы, распространение радиоволн в атмосфере и ионосфере в естественных и искусственно возмущенных условиях; радиофизические основы информационных систем. Далее представлены наиболее значимые результаты по данным направлениям исследований.

**1. Физика метеорных явлений и метеорное распространение  
радиоволн**

Метеорные тела являются составной частью Солнечной системы, срок их существования  $10^5 - 10^7$  лет, то есть значительно меньше возраста самой системы. Это значит, что мы имеем возможность проследить процессы их возникновения и эволюции. Метеорные рои образуются при разрушении кометных ядер или астероидов. Дальнейшая их эволюция идет за счет гравитационных возмущений планет, негравитационных эффектов Пойнтинга – Робертсона и Ярковского – Радзиевского, а также за счет их столкновений со спорадическими метеороидами.

Для исследования этих процессов необходимо определить по результатам наблюдений структуру метеорного роя вдоль орбиты Земли. Структурой роя принято считать плотность потока метеорных тел  $Q(m)$  выше заданной массы  $m$  и параметр  $S$  распределения метеорных тел по массам как функции долготы Солнца. Эти данные можно получить по результатам радиолокационных или визуальных наблюдений метеорных потоков. Оптические же наблюдения мало пригодны, так как из-за малой чувствительности статистически менее надежны.

Плотность потока метеоров роя  $Q(m)$  определяется как число метеорных тел с массой выше некоторой заданной, пересекающих в единицу времени единичную площадку, нормальную по отношению к вектору скорости. Сложность интерпретации наблюдений метеоров заключается в том, что внутри угла зрения наблюдателя или в пределах диаграммы направленности антенной системы радиолокатора минимальная регистрируемая масса метеороида и площадка меняются одновременно. В случае интерпретации визуальных наблюдений задача усложняется еще и тем, что необходимо учесть индивидуальные особенности наблюдателя и освещенность неба Луной.

В результате многолетних исследований был разработан метод обработки радиолокационных наблюдений метеорных потоков, позволяющий одновременно определять двумя способами (по общему числу зарегистрированных радиозехо и по числу эхо с длительностями более 1 с) плотность потока метеорных тел и параметр  $S$ .

Необходимость разработки метода обработки результатов визуальных наблюдений метеорных потоков была обусловлена следующими причинами: 1) возможностью обработки наблюдений, выполненных на интервале последних 150 лет с последующим их анализом, 2) возможностью обработки высокоскоростных метеорных потоков, для которых радиолокационный метод по ряду причин менее приемлем, 3) наличием обширной базы наблюдательных данных, полученных любителями астрономии. Решающими факторами в разработке метода обработки визуальных наблюдений метеоров оказались следующие: приведение наблюдаемого часового числа метеоров к зенитному часовому для метеоров ярче  $+3^m$  с учетом поправки на потери и формула, учитывающая засветку неба Луной. Данный метод позволил увеличить точность обработки данных в несколько раз по сравнению с существовавшим ранее [1].

Сравнение результатов обработки радиолокационных и визуальных наблюдений метеорных потоков Геминид и Квадрантид показало, во-первых, высокую надежность методов обработки и, во-вторых, что по точности визуальные наблюдения не уступают радиолокационным [2].

Результаты обработки визуальных наблюдений потока Персеид за интервал 1874–1996 гг. показали, что положение максимума активности не изменялось и соответствует долготе Солнца  $139.5^\circ$ , а вот плотность потока в максимуме за этот период времени увеличилась в 5 раз. Визуальные наблюдения метеорного потока Леонид были обработаны за 1866–1996 гг. Если исключить из рассмотрения интервалы времени, когда к орбите Земли приближалась родительская комета Темпеля–Туттля, то за 130 лет активность потока не изменилась, зато изменялось положение максимума активности по долготе Солнца – от  $232.8^\circ$  до  $235.6^\circ$  [3].

В 1975 г. в Казанском университете был разработан и введен эксплуатацию метеорный радар «КГУ М5» [4], который оснащён гониометром из 5 поворотных антенн. Погрешность определения углов прихода метеорных отражений данным радаром составляет менее  $1^\circ$ . Обзор небесной сферы осуществляется за счёт поворота антенн по сторонам света каждые 15 мин. Радар работал в режиме мониторинга с 1986 по 1991 гг. непрерывно и сессиями в 1993–1994, 1998–2003 гг. Он использовался, в частности, для исследования притока на Землю метеорного вещества с применением томографических методов анализа [5, 6].

Наиболее значительными за последние годы являются результаты исследования орбитальной структуры метеорного комплекса вблизи орбиты Земли на основе использования дискретного квазитомографического подхода [7] и микропотоковой гипотезы. Метод обеспечивает обнаружение с вероятностью 82% и измерение пара-

метров микропотока с пуассоновским распределением его интенсивности, который имеет не менее 6 метеоров в сутки из ячейки небесной сферы  $2 \times 2$  град в интервале скоростей 3 км/с. Таких малых потоков обнаружено более 1000 за месяц наблюдений [8]. Получены данные о распределении радиантов и скоростей микропотоков по северной небесной полусфере за 70 месяцев непрерывных наблюдений на метеорном радаре и измерены параметры их орбит. Обнаружено, что спорадический метеорный комплекс и известные крупные метеорные потоки имеют коррелированные структуры, воспринимаемые радаром как микропотоки. Часть микропотоков объединяется в ассоциации, природу которых ещё предстоит выяснить. Наиболее характерным примером ассоциации является метеорный поток Дневные Ариетиды. Этот поток недоступен наблюдениям оптическими методами из-за близости его радианта Солнцу и потому недостаточно изучен. Радарные наблюдения других авторов для разных лет давали противоречивые данные о параметрах орбит этого потока. Обычно эти различия относили за счет малой точности радарных измерений. Дискретный квазитомографический анализ обеспечивает приблизительно в 5 раз более высокое разрешение. Анализ орбитальной структуры Ариетид за 4 года наблюдений (1986, 1987, 1988, 1994) показал [9], что изменение суточной численности метеоров потока Ариетиды по дням демонстрирует несколько максимумов, каждый имеет свои координаты и проявляется в разные годы.

Распределение активности парциальных роёв по расстояниям до перицентра и афецентра показывает, что афелий основной части роя лежит в поясе астероидов, а перигелийное расстояние парциальных роёв меняется от 0.016 до 0.2 А.Е. при уменьшении наклона от  $40^\circ$  до  $15^\circ$  (см. рис. 1). На рис. 2 приведено распределение парциальных микророёв Ариетид по координатам перигелия. Видно, что долгота  $L$  совокупности парциальных роёв уменьшается от  $110^\circ$  до  $100^\circ$  с ростом широты  $B$  от  $0^\circ$  до  $20^\circ$ . Диапазон изменения координат перигелия близок диапазону изменения координат перигелия недавно (2001 г.) открытого семейства малых комет Марседна [10], так что семейство роёв Ариетиды возможно связано с семейством малых комет, объединённых общностью происхождения. Отметим, что Ариетиды – наиболее яркий пример ассоциации микропотоков, отображающий эволюцию метеорного вещества. Анализ полученных экспериментальных данных позволит прояснить многие неясные ещё вопросы относительно структуры метеорного комплекса, его динамики и эволюции, поскольку орбиты метеорных роёв – более стабильные образования, чем орбиты комет, и они сохраняют память о событиях, порождающих их. Кроме того, микропотоки низкого уровня активности (4–7 метеоров в сутки) возможно являются неоднородностями спорадического комплекса и могут быть использованы для изучения распределения параметров его орбит.

Метеорный радиоканал обладает свойствами, не обнаруженными в других радиоканалах одновременно:

- случайностью появления метеорного следа как во времени, так и в пространстве: для каждого метеорного следа будет своя зеркальная точка (положение которой будет случайно в пространстве) и вследствие этого будет случайно время распространения ( $\tau_{AB}$ );

- большим разбросом времени распространения  $\delta\tau$  от метеора к метеору, обусловленным случайными координатами следа метеорной ионизации;

- взаимностью: одинаковым с экспериментально доказанной точностью в доли наносекунды временем распространения сигнала  $\tau$  в обоих направлениях в пределах одного метеорного отражения: ( $\tau_{AB}$ ,  $\tau_{BA}$ ), где  $A$  и  $B$  – пункты линии связи,

$$\Delta\tau = |\tau_{AB} - \tau_{BA}| \leq 10^{-9} \text{ с}; \quad (1)$$

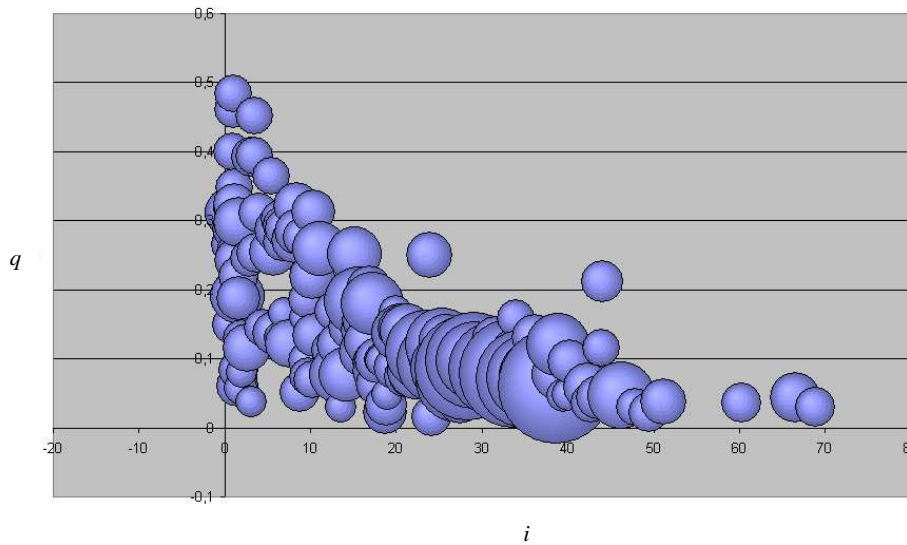


Рис. 1. Распределение парциальных микропотоков Дневные Ариетиды по перигелийному расстоянию  $q$  и наклону  $i$  за 4 года наблюдений. Число метеоров в парциальном микропотоке представлено размерами пузырьков

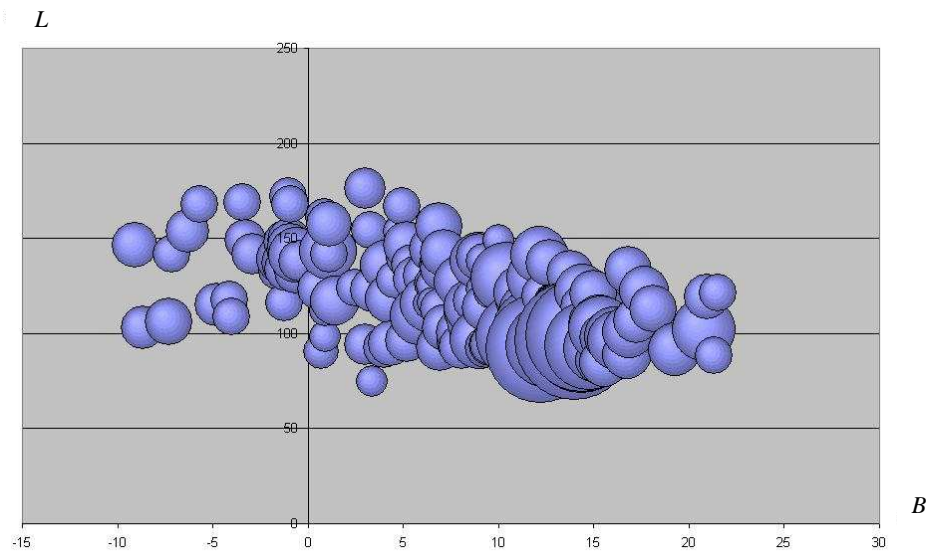


Рис. 2. Распределение активности  $N$  микропотоков по координатам перигелия ( $B$  – широта,  $L$  – долгота)

– высокой стабильностью условий распространения в пределах одного отражения: экспериментально показано, что фазовая нестабильность, вызванная ветровым сносом метеорного следа, составляет

$$\frac{d\varphi}{dt} = (5\pi \div 10\pi) \text{ радиан/с} \quad (2)$$

Время распространения ( $\tau_{AB}$ ) может быть использовано в качестве природного случайного ключа для шифрации и дешифрации информации. На основании

изложенных выше фактов был предложен (А.В. Карпов, В.В. Сидоров) метод, обеспечивающий совершенную защиту информации при передаче данных по любому открытому каналу связи [11].

Проведены экспериментальные исследования характеристик метеорного распространения радиоволн на коротких радиоперелиниях [12, 13]. Обоснован оригинальный метод управления антеннами «слежение за отражающей областью», позволяющий вдвое повысить скорость передачи информации в сети метеорной радиосвязи [14].

## 2. Физика атмосферы и ионосферы. Распространение радиоволн в ионосфере

Проблема распространения радиоволн сохраняет свою актуальность при решении многих задач радиосвязи, локации, пеленгации, мониторинга окружающей среды и др. Важнейшей задачей является построение модели ионосферного инфокоммуникационного канала в различных условиях, в том числе при искусственных воздействиях. Эта задача решалась в КГУ в совместных работах с коллегами НИРФИ, МарГТУ, Лестерского университета (Великобритания). В период с 2000 по 2005 гг. получены следующие результаты:

- на сети среднеширотных КВ-радиоперелиний протяженностью от 2600 до 5700 км выявлены геомагнитный контроль и влияние «восходно-заходного» эффекта остаточной компоненты суточного хода максимально-наблюдаемых частот [16];

- на сети высокоширотных КВ-радиоперелиний протяженностью от 420 до 1400 км были измерены времена задержек сигналов, доплеровское смещение частоты, уширение спектра сигнала, углы прихода радиосигналов в вертикальной и горизонтальной плоскостях в различных гелиогеофизических условиях. Установлено влияние на параметры радиоканала состояния межпланетного магнитного поля ( $B_y$ ,  $B_z$  – компоненты), солнечной активности (числа Вольфа и интенсивность излучения на длине волны 10.7 см), геомагнитных индексов  $K_p$ ,  $D_{st}$ ,  $A_p$  [17].

Известно, что вблизи уровня отражения от ионосферы мощной радиоволны о-поляризации возбуждаются искусственные ионосферные неоднородности (ИИН). Для расчета параметров радиоперелиний, использующих рассеяние на ИИН, необходимы данные о пространственном спектре неоднородностей. Ранее в совместно выполненных с НИРФИ исследованиях было установлено, что в интервале поперечных масштабов неоднородностей  $1.9 \text{ м} \leq l_{\perp} \leq 7 \text{ м}$  спектр имеет степенную форму ( $\varepsilon_{\perp}^{-p}$ ,  $\varepsilon_{\perp} = 2\pi/l_{\perp}$ ) в плоскости, ортогональной геомагнитному полю с  $p \approx 1$ . В экспериментах 2000 г. по радиопросвечиванию возмущенной области сигналами ИСЗ установлено, что в интервале поперечных масштабов неоднородностей  $30 \text{ м} \leq l_{\perp} \leq 400 \text{ м}$  значение  $p \leq 2$  [18]. Данные о пространственном спектре используются для расчета энергетики канала рассеяния радиоволн на ИИН.

Детализация физических процессов в искусственно возмущенной ионосфере требует знания механизмов ускорения электронов на начальной стадии развития искусственной ионосферной турбулентности. Информацию можно получить по динамике излучения ионосферы в оптическом диапазоне длин волн. В экспериментах КГУ и НИРФИ обнаружено усиление свечения в F-области на длине волны 557.7 нм при накачке ионосферы импульсами длительностью  $\tau = 5 \text{ мс}$  [19]. Эффект связан с ускорением электронов ленгмюровскими волнами на высотах отражения мощной радиоволны о-поляризации. В экспериментах 2001 г. использовался сложный временной режим накачки, позволяющий оценить, какие из волн – ленгмюровские или верхнегибридные – более эффективно ускоряют электроны [20]. Показано, что ответ на этот вопрос требует дальнейших систематических исследований с привлечением данных по радиозондированию возмущенной области.

Существенное влияние на надежность и качество связи оказывает спорадический слой E. Данный слой позволяет осуществлять радиосвязь на частотах, превышающих максимально-применимые частоты (МПЧ) регулярных слоев ионосферы, а также приводит к нарушению радиосвязи, экранируя вышележащие области ионосферы. Поэтому необходимо производить учет его влияния на распространение радиоволн декаметрового диапазона.

Выполнены длительные экспериментальные исследования параметров слоя Es методами вертикального и наклонного зондирования на скользящей частоте, а также измерения энергетических характеристик Es-сигналов на фиксированных частотах с помощью специально разработанного ионосферного комплекса. Особо следует отметить метод определения максимально-наблюдаемой частоты для слоя Es (МНЧ-Es) [21]. Такое название параметра МНЧ-Es обусловлено зависимостью данной частоты от порогового уровня приемника. На среднестатистической основе получена аналитическая зависимость МНЧ-Es от величин foEs и foE, регистрируемых в центре трассы:

$$\text{МНЧ-Es} = \frac{0.58 - \lg(\rho E_{\text{сноп}})}{1.57} \cdot \sqrt{\text{foEs}^2 - \text{foE}^2} \cdot \sec(\varphi), \quad (3)$$

где  $\rho E_{\text{сноп}}$  – пороговое значение коэффициента отражения,  $\varphi$  – угол падения волны на слой Es.

Выявлено три диапазона частот с различным влиянием слоя Es на характер радиосвязи. Определено оптимальное значение порогового уровня сигнала, равное –45 дБ, работа на данном уровне позволяет значительно расширить диапазон применимых частот, так как при этом значение поправочного коэффициента к закону секанса повышается в 1.4 раза [21].

Построены алгоритмы статистического моделирования радиоканала при наличии слоя Es для решения задач определения распределений уровня Es-сигналов на радиолиниях и максимально-применимых частот для слоя Es на однократковых среднеширотных трассах с учетом их технической оснащенности. Расчет по данным алгоритмам позволяет произвести долгосрочный прогноз диапазона применимых частот и повысить надежность радиосвязи на трассе до 1.5 раз в зависимости от рабочей частоты и времени суток [22].

На основании найденных закономерностей параметров слоя Es при вертикальном и наклонном зондированиях можно построить прогноз вероятности  $\eta_{\text{Es}}$  при наклонном зондировании. Для того чтобы проверить методы пересчета, использовались данные, полученные на трассе София–Прага при  $f = 40.5$  МГц в июне–августе 1965 г., кроме того, использовались данные по вертикальному зондированию за это время, полученные в центре трассы на станции Бекешаба. На рис. 3, а представлены суточные изменения вероятности появления Es-слоя  $P(\text{foEs})$ , нижняя кривая относится к вероятности появления слоя Es с foEs > 5 МГц, последующие – больше 5.5; 6; 6.5 МГц соответственно. На рис. 3, б сплошной линией показаны экспериментальные изменения вероятности появления радиосигналов  $\eta_{\text{Es}}$  в течение суток для трассы СП-40 с  $U_n = 1$  мкВ. Здесь же штриховой линией представлены расчетные изменения  $\eta_{\text{Es}}$ , полученные на основе приведенной выше методики с учетом энергетики данной радиолинии. Наблюдается хорошее соответствие между экспериментальной и расчетной кривыми, при этом максимальное относительное отклонение между ними не превышает 20%. Штрих-пунктирной линией на рис. 3, б нанесены суточные изменения  $\eta_{\text{Es}}$ , рассчитанные с помощью метода МККР. Видно, что они отличаются от экспериментальной кривой  $\eta_{\text{Es}}$ . Более того, в ночные часы величина  $\eta_{\text{Es}}$  практически равна 0, что неверно. Таким образом, методы, разработанные нами, более адекватно описывают экспериментальные результаты.

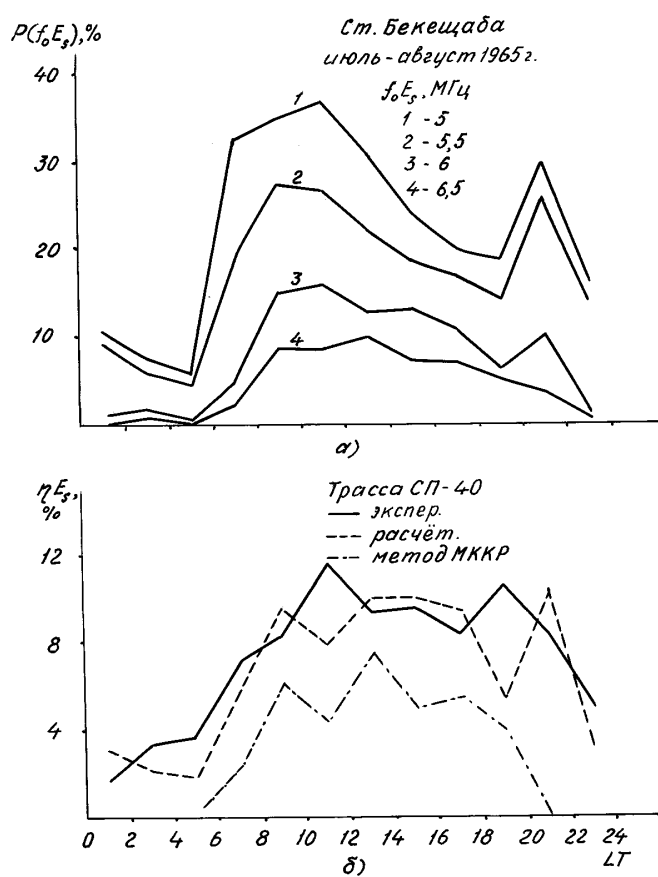


Рис. 3. Вариации вероятности появления слоя Es для ст. Бекещаба (а) и коэффициента заполнения для слоя Es на трассе София–Прага при  $f = 40.5$  МГц (б) в течение суток; сплошная линия – эксперимент, штриховая – расчет, штрих-пунктирная – расчет по методике МККР

На основе экспериментально наблюдаемых радиометеорным методом спектров турбулентных неоднородностей рассматривается природа радиоотражений в диапазоне полупрозрачности слоя Es при вертикальном зондировании ионосферы [23]. Получено, что уровень обратно рассеянного сигнала для инерционной области масштабов турбулентных неоднородностей не может объяснить наблюдаемые экспериментально диапазоны полупрозрачности слоя Es свыше 0.5 МГц. Диапазон полупрозрачности свыше 1 МГц может быть обусловлен отражением радиоволн от неоднородностей с масштабами, сопоставимыми с первой зоной Френеля для отраженной радиоволны. Данные масштабы неоднородностей соответствуют турбулентным флуктуациям электронной концентрации в крупномасштабной и архимедовой областях.

На распространение радиоволн сантиметрового диапазона значительное влияние оказывает нижняя тропосфера. В работах [24–29] рассмотрены пространственно-временные вариации коэффициента преломления радиоволн сантиметрового диапазона в нижней тропосфере. По многолетним данным ежеминутных измерений метеопараметров (1996–2003 гг.) исследованы вариации коэффициента преломления и индекса рефракции от мезомасштабных до сезонных. Впервые определены их среднееголетние и максимальные значения для различных временных мас-

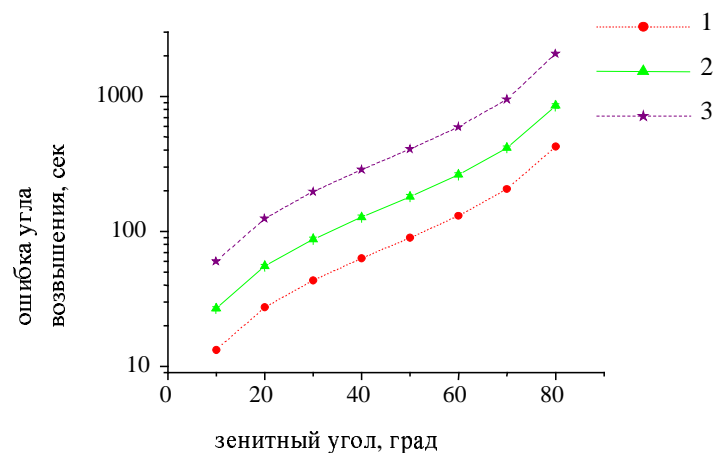


Рис. 4. 1 – систематическая ошибка угла возвышения, рассчитанная без учета мезомасштабных неоднородностей; 2 – систематическая ошибка угла возвышения, рассчитанная с учетом мезомасштабных неоднородностей; 3 – дисперсия ошибки угла возвышения, рассчитанная с учетом мезомасштабных неоднородностей

штабов. К наиболее неожиданным и интересным результатам можно отнести факт значительного превышения интенсивности мезомасштабных вариаций индекса рефракции над суточными в отдельные периоды времени, хотя их средний вклад в общую изменчивость составляет 16–20%.

Амплитуда сезонных вариаций преобладает, хотя средний вклад в дисперсию равен 18%. Вторыми по интенсивности индекса рефракции, а значит и коэффициента преломления, являются суточные вариации. Интенсивность синоптических вариаций слабо преобладает над мезомасштабными, но именно они дают наибольшую изменчивость индекса рефракции.

Разработана модель основных закономерностей пространственно-временной структуры (включая мезомасштабные) коэффициента преломления сантиметровых радиоволн в тропосфере с использованием не имеющих аналогов эмпирических закономерностей, полученных по синхронным ежеминутным независимым измерениям на 9-и автоматизированных станциях волновых возмущений мезомасштабных вариаций метеопараметров, аэрозоля, химических примесей и других атмосферных параметров, влияющих на распространение радиоволн сантиметрового диапазона в тропосфере.

В модели учитывается, что волновые вариации могут существовать не во всем пограничном слое, а лишь до какой-либо случайной высоты, далее разрушаясь. Учитывалось распределение влажности и температуры с высотой. Выбор такого метода оценки вполне оправдан тем, что мезомасштабные волны не вполне случайны, они могут быть вызваны орографическими источниками и распространяются на сотни километров. Учитывая, что скорость распространения радиоволн значительно больше, чем скорость мезомасштабных неоднородностей, можно считать, что в течение времени распространения радиосигнала поле коэффициента преломления детерминировано и определяется пространственными вариациями температуры, давления и влажности.

Расчеты показали (см. рис. 4), что ошибки, вносимые мезомасштабными процессами в угол рефракции и фазовые флуктуации, примерно на порядок превышают значения, полученные без учета влияния мезомасштабных волн.



Проведен учет влияния мезомасштабных неоднородностей на ошибки определения дальности для горизонтально и вертикально направленных радиотрасс. Показано, что поправка на запаздывание радиосигнала может измениться в два раза, а фазовые флуктуации сантиметровых радиоволн – на порядок за счет влияния мезомасштабных неоднородностей коэффициента преломления.

Использование технических средств радиолокации метеорных следов позволило разработать радиофизический метод исследований высотной структуры динамики мезосферы – нижней термосферы. Создана и поступила в международный обмен информационная база данных о параметрах динамических процессов в интервале высот 80–100 км на основе многолетних наблюдений [30].

Исследованы высотная и частотная структуры волновых возмущений нижней и средней атмосферы Земли в широком диапазоне временных масштабов от масштабов внутренних гравитационных волн до масштабов планетарных волн, а также внутригодовых и межгодовых колебаний. Изучена эффективность вихревых потоков, создаваемых волновыми возмущениями с масштабами планетарных волн в интервале высот 0–100 км по радиометеорным измерениям в г. Казани (80–100 км) и данным BADC UKMO (база данных метеорологического общества Великобритании), установленные особенности высотной структуры эффективности вихревых потоков соответствуют высотам смены режима зональной циркуляции. Выполненные исследования волновой активности с масштабами гравитационных волн в интервале высот 80–100 км показали, что вклад за счет волновых ускорений в зональную циркуляцию равен 15% и в меридиональную – 50–100%. Вклад в сезонную изменчивость в зависимости от высоты составляет 35–100% для годовых и полугодовых вариаций меридиональной циркуляции и 10–400% в зональной циркуляции. Результат указывает на определяющую роль волновых потоков при формировании меридиональной циркуляции и ее годовых и полугодовых колебаний [31].

Выполнены исследования нелинейных взаимодействий в диапазоне частот, характерных для приливов и планетарных волн. Полученные экспериментальные результаты объяснены в приближении квадратичной нелинейности. При этом первичные и возникшие вторичные комбинационные волны, а также их фазы удовлетворяют соотношению  $f_1 \pm f_2 = f_3$ ,  $\phi_1 \pm \phi_2 = \phi_3$ , т. е. условию резонанса. В результате исследований установлена многоволновая структура приливных движений [32].

Использование базы данных среднесуточных значений ветра, полученных в один и тот же период радиометеорным методом в интервале высот 80–100 км и 0–55 км, по данным BADC UKMO (для региона Казани) позволило получить локальную высотно-сезонную структуру преобладающего зонального и меридионального ветра и параметров его годовых и полугодовых колебаний. Эти результаты использованы при развитии региональной климатической модели фоновой циркуляции в интервале высот 0–100 км.

С использованием международной базы данных, в том числе базы данных, полученных в Казанском университете, в соавторстве с российскими и зарубежными учеными разработана и опубликована двумерная климатическая модель фонового ветра для высот 70–100 км [33]. Разработанные модели представляют интерес при конструкции новой версии модели CIRA.

Предложен, разработан и реализован новый подход исследований влияния солнечной активности на термодинамические процессы в нижней и средней атмосфере Земли (0–100 км). Установлены значимые корреляционные связи временных вариаций солнечной активности и таких крупномасштабных процессов, как фоновая циркуляция и ее годовые и полугодовые колебания [34]. Установлен гео-гелио-

контроль частотных характеристик  $E_s$  опосредованным влиянием геомагнитной активности на динамические параметры нейтральной атмосферы [35].

Установленные закономерности высотной структуры динамического режима в интервале 0–100 км и их модельное представление важны для адекватного моделирования глобальной циркуляции, структуры ионосферы и прогноза характеристик среды распространения радиоволн.

### Summary

*O.I. Bel'kovich, A.V. Karpov, A.M. Nasyrov, V.V. Sidorov, G.M. Teptin, A.N. Fakhrutdinova, O.N. Sherstyukov.* Radiophysical investigations of the near-Earth cosmic space at Kazan State University.

Some results of near-Earth cosmic space investigations obtained recently in Kazan State University by means of radiophysical methods are presented. These results are concerned the low atmosphere, the low high mesosphere (low thermosphere and ionosphere). Also the questions about influence of the low and middle atmosphere parameters on radio waves propagation are considered.

### Литература

1. *Белькович О.И., Ишмухаметова М.Г., Сулейманов Н.И.* Современные методы обработки визуальных наблюдений метеорных потоков // *Астроном. Вестн.* – 2001. – Т. 35, № 5. – С. 440–448.
2. *Belkovich O.I., Ishmukhametova M.G., Suleimanov N.I.* Comparative analysis of meteor shower observations processed by three different methods // *Proc. Of the Meteoroids 2001 Conference.* – Kiruna, Sweden, 2001. – P. 91–94.
3. *Belkovich O.I., Ishmukhametova M.G.* The Perseids and Leonids from the last of 130 years of observations // *Meteoroids 1998. Proc. Intern. Conference.* – Bratislava, 1999. – P. 203–206.
4. *Макаров В.А., Нестеров В.Ю., Пупышев Ю.А., Сидоров В.В., Степанов А.М., Факхрутдинова А.М., Шувариков В.А.* Радиолокационный комплекс КГУ-М5 для измерения координат отражающих точек на метеорном следе // *Метеорное распространение радиоволн.* – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1981. – Вып. 17. – С. 96–100.
5. *Пупышев Ю.А.* Определение видимого распределения плотности радиантов спорадических метеоров из азимутальных радиолокационных наблюдений // *Результаты МГГ.* № 14. – М.: Наука, 1965.
6. *Белькович О.И., Сидоров В.В., Филимонова Т.К.* Вычисление распределения метеорных радиантов по наблюдениям на одной радиолокационной станции с угломером // *Астроном. Вестн.* – 1991. – Т. 25, № 2. – С. 225–232.
7. *Сидоров В.В., Калабанов С.А.* Метод решения задачи определения координат радиантов метеорных потоков по угломерным данным метеорного радара // *Астроном. Вестн.* – 2003. – Т. 37, № 2. – С. 162–173.
8. *Sidorov V., Kalabanov S., Sidorova S., Filin I., Filimonova T.* Associations of meteor microshowers or as the Kazan radar “sees” radiants on northern celestial hemisphere, Earth, Moon and Planets (2005) 00:1-15.
9. *Сидоров В.В., Филин И.В., Калабанов С.А., Сидорова А.Д.* Угловая и временная структура и распределение элементов орбит метеорного потока дневные ариетиды и её возможная связь с короткоперигелийными кометами // *Сб. тр. Второго Межд. радиоэлектронного Форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», Харьков, сент. 2005 г.*

10. Горбанёв Ю.М., Князькова Е.Ф. Молодые метеорные рои вблизи Солнца. II Статистическая связь метеоров с семейством короткопериодических комет // Астроном. Вестн. – 2003. – Т. 37, № 5. – С. 1–14.
11. Карпов А.В., Сидоров В.В. Заявка на изобретение «Способ защиты информации в метеорном радиоканале путем шифрования случайным природным процессом». – № 2004105658/09(005904).
12. Карпов А.В. Компьютерная модель метеорного радиоканала // Изв. вузов. Радиофизика. – 1995. – Т. 38. – С. 1177–1186.
13. Карпов А.В., Курганов А.Р., Сидоров В.В., Терешин С.Н. Моделирование оптимальных режимов метеорной радиосвязи // Радиотехника, ИПРЖР. – 1999. – № 8. – С. 4–15.
14. Карпов А.В., Наумов А.В. Исследование влияния взаимной ориентации антенн на характеристики метеорного радиоканала // Изв. вузов. Радиофизика. – 2002. – Т. 35, № 8. – С. 684–689.
15. Карпов А.В., Юмагулов Е.З. Исследование тонкой пространственной структуры метеорных потоков на основе реляционной базы данных «Метеор» // Астроном. Вестн. – 2003. – Т. 37, № 3. – С. 232–235.
16. Иванов В.А., Лыонг Вьет Лок, Насыров А.М., Рябова Н.В. Фильтрация случайной компоненты суточных вариаций максимально наблюдаемых частот дальних ионосферных радиополос // Тр. 10-й междунауч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» – Воронеж, 2003. – Т. 2. – С. 1129–1139.
17. Warrington E.M., Stoker A.J., Zaalov N.Y., Siddle D.R., Nasyrov I.A. Propagation of HF radiowaves over northerly path: measurements, simulation and system aspects // Annales of geophysics. – 2004. – V. 47, No 2/3. – P. 1161–1177.
18. Мясников Е.Н., Муравьева Н.В., Сергеев Е.И., Фролов В.Л., Насыров А.М., Насыров И.А., Белей В.С., Колосков А.В., Ямпольский Ю.М., Гровс К.М. О форме пространственного спектра искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых мощным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44, № 11. – С. 903–917.
19. Gumerov R.I., Karikov V.B., Komrakov G.P., Nasyrov A.M. Artificial ionospheric glow caused by the short-term. Effect of high-power RF radiation // Radiophysics and Quantum electronics. – 1999. – V. 42, No 6. – P. 463–465.
20. Grach S.M., Sergeev E.N., Nasyrov A.M., Gumerov R.I., Shaimukhametov R.R., Nasyrov I.A., Komrakov G.P. Simultaneous observations of the 557,7 nm airglow and stimulated electromagnetic emission during HF pumping of the ionosphere with diagnostic schedule: first results // Advances in Space Res. – 2004. – V. 4. – P. 2422–2427.
21. Шерстюков О.Н., Минуллин Р.Г., Акчуринов А.Д., Назаренко В.И., Сапаев А.Л., Зыков Е.Ю. Влияние спорадического слоя E на распространение метровых и дециметровых радиоволн на коротких трассах // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2000. – Т. 40, № 5. – С. 69–74.
22. Шерстюков О.Н., Минуллин Р.Г., Акчуринов А.Д., Зыков Е.Ю. Влияние крупномасштабной структуры слоя Es на предельные частоты при наклонном падении // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2001. – Т. 41, № 1. – С. 227–232.
23. Шерстюков О.Н., Стенин Ю.М. Влияние турбулентных неоднородностей на полупрозрачность слоя Es // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2002. – Т. 42, № 1. – С. 102–107.
24. Тептин Г.М. Макротурбулентные характеристики средней и нижней тропосферы и рассеяние радиоволн. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2004. – 178 с.

25. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Волновые возмущения локальных и синоптических масштабов по синхронным измерениям атмосферных примесей // Докл. РАН. – 2005. – Т. 400, № 1. – С. 110–112.
26. Хуторова О.Г. Волновые процессы в приземной атмосфере по синхронным измерениям примесей и метеопараметров. – Казань: Центр инновационных технологий, 2005. – 275 с.
27. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Исследование мезомасштабных вариаций в тропосфере по наблюдениям концентрации примесей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37, № 6. – С. 853–856.
28. Журавлев А.А., Хуторова О.Г. Рефракция электромагнитных волн в реальной турбулентной атмосфере с загрязнениями // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14, № 2. – С. 137–141.
29. Тептин Г.М., Хуторова О.Г., Журавлев А.А. Модель среднеширотного спектра турбулентных флуктуаций градиента электронной концентрации // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2002. – Т. 42, № 2. – С. 235–238.
30. Фахрутдинова А.Н. Циркуляция мезосферы – нижней термосферы средних широт. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2004. – 167 с.
31. Фахрутдинова А.Н., Хуторова О.Г. Влияние внутренних гравитационных волн на динамический режим нижней термосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 34, № 1. – С. 19–24.
32. Fahrutdinova A.N., Fedorov D.V. Multiwave structure of tidal motions in upper mesosphere – lower thermosphere // Environmental Radioecology and Applied Ecology. – 2005. – V. 3, No 5. – P. 20–27.
33. Portnyagin Yu., Solovjova T., Merzlyakov E., Forbes J., Palo S., Ortlund D., Hocking W., MacDougall J., Thayaparan T., Manson A., Meek C., Hoffmann P., Singer W., Mitchell N., Pancheva D., Igarashi K., Murayama Y., Jacobi Ch., Kuerschner D., Fahrutdinova A., Korotyshkin D., Clark R., Taylor M., Franke S., Fritts D., Tsuda T., Nakamura T., Gurubaran S., Rajaram R., Vincent R., Kovalam S., Batista P., Poole G., Malinga S., Fraser G., Murphy D., Riggan D., Aso T., Tsutsumi M. Mesosphere/lower thermosphere prevailing wind model. // Adv. Space Res. – 2004. – No. 3. – P. 1755–1762. (doi:10.1016/j.asr.2003.04.058).
34. Бердунов Н.В., Фахрутдинова А.Н., Нугманов И.С. Долговременные изменения преобладающего ветра в верхней мезосфере - нижней термосфере и связь с солнечной активностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 658–663.
35. Maksyutin S.V., Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N. Es layer and dynamics of neutral atmosphere during the periods of geomagnetic disturbances // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2001. – V. 63, No 5. – P. 545–549.

Поступила в редакцию  
05.10.05

---

**Белькович Олег Игоревич** – доктор физико-математических наук, профессор Зеленодольского филиала Казанского государственного университета.

E-mail: [beikovi@mail.ru](mailto:beikovi@mail.ru)

**Карпов Аркадий Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: [Arkady.Karpov@ksu.ru](mailto:Arkady.Karpov@ksu.ru)

**Насыров Альберт Махмутович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники Казанского государственного университета.

E-mail: *Albert.Nasyrov@ksu.ru*

**Сидоров Владимир Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *Vladimir.Sidorov@ksu.ru*

**Тептин Герман Михайлович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоастрономии Казанского государственного университета.

E-mail: *Guerman.Teptin@ksu.ru*

**Фахрутдинова Антонина Николаевна** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник проблемной радиоастрономической лаборатории Казанского государственного университета.

E-mail: *Antonina.Fahrutdinova@ksu.ru*

**Шерстюков Олег Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *Oleg.Sherstyukov@ksu.ru*