

О Т З Ы В

**официального оппонента
на диссертацию Киселева Олега Николаевича
«ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ТРОПОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ И ДАЛЬНОСТЬ
ДЕЙСТВИЯ ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ», пред-
ставленную на соискание ученой степени доктора технических наук по спе-
циальности 01.04.03- Радиофизика**

Актуальность исследования

В последнее время стало понятно, что усредненные модели индекса рефракции радиоволн в тропосфере не помогают решить задачи увеличения точности в задачах точного позиционирования объектов в силу присутствия атмосферных неоднородностей. Наименее изученными из них являются мезомасштабные неоднородности в силу того, что мезомасштабная неоднородная структура реальной атмосферы, в том числе поля коэффициента преломления, меняется во времени, зависит от реальных гео- и метеоусловий на местности. Для всестороннего изучения указанных явлений и процессов необходимы трехмерные данные о полях атмосферных параметров и их динамика. Постановка эксперимента требует высокого временного и пространственного разрешения измерительной аппаратуры.

Основное содержание работы

Представленная диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, трех приложений. Основная часть диссертации содержит 287 страниц печатного текста. Список литературы включает 299 источников. По теме диссертации опубликовано 33 основные работы, в том числе 14 из них – статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК, две монографии.

Во введении сформулированы актуальность диссертации, научная новизна, практическая значимость работы, апробация результатов, изложена структура работы.

Первая глава посвящена анализу работ о мезомасштабных неоднородностях атмосферы. Рассмотрены механизмы их формирования. Показано, что мезомасштабные процессы обуславливают флуктуаций угла прихода радиоволн и существенных колебаний амплитуды радиосигналов на тропосферных радио-

трассах. Обоснована необходимость оценки влияния мезомасштабных неоднородностей на точность радиотехнических систем.

Во второй главе найдены характеристики крупномасштабных неоднородностей коэффициента преломления тропосферы на трассах распространения радиоволн над поверхностью суши (раздел 2.1) и моря (раздел 2.2). Разработана методика расчёта статистических характеристик флуктуаций коэффициента преломления над земной поверхностью, основанная на использовании параметров топографии подстилающей поверхности метеоданных. В разделе 2.3 по экспериментальным данным сделаны оценки характеристик слоистых неоднородностей коэффициента преломления над поверхностью Тихого океана на высотах более 0,8 км.

Третья глава посвящена решению задачи оценки флуктуаций параметров радиосигналов, возникающих из-за влияния мезомасштабных тропосферных неоднородностей.

Представлено объяснение механизма формирования медленных флуктуаций параметров сигнала, возникающих при распространении радиоволн УКВ диапазона над неровной земной поверхностью при наличии случайной азимутальной рефракции. Получено выражение для структурной функции медленных вариаций фазового фронта, характеристики которой определяются величиной мезомасштабных флуктуаций коэффициента преломления приземного слоя атмосферы и геометрией неровностей подстилающей поверхности.

Исследована модель распространения радиоволн УКВ диапазона за радиогоризонтом, основанная на гипотезе о наличии в объёме рассеяния мезомасштабных наклонных отражающих слоёв со случайной пространственной ориентацией. Модель позволила объяснить наличие медленных азимутальных вариаций углов прихода, достигающих до 5° , в зоне тропосферного распространения радиоволн.

Разработана методика расчёта дисперсии мезомасштабных азимутальных флуктуаций углов прихода с учетом топографии.

Четвертая глава посвящена описанию экспериментальных исследований распространения радиоволн на сухопутных и морских трассах в период с 1963 г. по 1994 г. Представлены схемы экспериментов, технические характеристики использованной аппаратуры.

В пятой главе анализируются результаты экспериментов распространения радиоволн над сушей, описанных в четвертой главе. Обнаружены флуктуации амплитуды и фазы радиосигналов с длинами волн от 3 см до 3,4 м.

Проведено сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей среднеквадратических отклонений углов прихода радиоволн на тропосферных трассах, которое показало соответствие теории и эксперимента. Выявлено незначительное влияние атмосферных фронтов на флуктуации углов прихода радиоволн. Показано, что медленные вариации структуры фазового фронта, искажения спектров радиосигналов, загоризонтное распространение УКВ радиоволн вызваны в основном мезомасштабными атмосферными неоднородностями и подстилающей земной поверхностью.

В шестой главе изложены результаты исследований уровня сигнала на тропосферных радиотрассах, полученные в акватории Тихого океана.

Исследованы зависимости уровня сигналов от длины трассы, частоты, сезона, региона и метеоусловий. Обнаружено незначительное влияние волноводов испарения на уровень сигналов. Показано, что определяющим фактором формирования повышенного уровня сигнала за радиогоризонтом является наличие мезомасштабных слоистых неоднородностей, расположенных на высотах от сотен метров до единиц километров.

Седьмая глава посвящена построению регрессионных моделей для прогноза среднечасовых уровней радиосигналов в зависимости от параметров тропосферных неоднородностей при их измерении существующими метеорологическими и аэрологическими приборами.

Обоснована необходимость исключения годового хода уровня сигнала и метеопараметров при выполнении регрессионного анализа результатов радиометеорологических измерений на трассах распространения радиоволн.

Определён набор радиометеорологических параметров, необходимый в регрессионной модели оценки среднечасовых значений множителя ослабления в зоне дальнего тропосферного распространения.

В восьмой главе описываются методы оценки погрешностей местоопределения и ослабления амплитуды сигналов в радиотехнических системах с учетом мезомасштабных флуктуационных явлений при распространении дециметровых радиоволн в тропосфере.

Получены оценки погрешностей местоопределения угломерными системами с учетом вклада крупномасштабных флуктуаций углов прихода в общую ошибку определения азимутальных углов на тропосферных трассах протяжённостью до 500 км. Предложена методика картографирования ошибок измерения угловых координат, возникающих из-за наличия локальных, постоянно суще-

ствующих мезомасштабных возмущений коэффициента преломления на наземных сухопутных трассах протяженностью до 100 км.

Предложена методика прогноза множителя ослабления и дальности действия радиосистем в зоне дальнего тропосферного распространения.

Обсуждается возможность совместного использования численных моделей прогноза метеопараметров и разработанных статистических методов для более точного прогноза распространения радиоволн.

В **заключении** изложены результаты работы.

В **приложениях** представлены акты о внедрении результатов диссертации и копии авторских свидетельств.

Новизна, научная и практическая ценность

Впервые получены следующие основные результаты диссертации: физико-статистическая модель мезомасштабных неоднородностей коэффициента преломления радиоволн; методика построения карт прогноза ошибок измерения азимутальных углов за счет медленных фазовых флуктуаций, возникающих на наземных пересечённых трассах распространения радиоволн при различных метеоусловиях; численная модель формирования электромагнитного поля УКВ за радиогоризонтом, построенная с учетом объёмных мезомасштабных неоднородностей; модель и методики прогноза и диагноза дальности действия загоризонтных тропосферных радиолокационных систем по данным метеорологических и аэрологических измерений.

Картографические материалы методики представлены в Радиоклиматическом тропосферном атласе Тихого океана, созданном в качестве справочного пособия для анализа условий распространения радиоволн УКВ-диапазона в тропосфере над морской поверхностью.

Представлены авторские свидетельства на программы имитационного моделирования мезомасштабных флуктуаций неэнергетических характеристик радиолокационных сигналов за горизонтом и загрузки отчетов по измерению метеоданным в различных регионах Земли. Разработанные методики и программы могут использоваться при проектировании пассивных тропосферных систем местоопределения. Результаты диссертации используются в учебном процессе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Достоверность

Проведенные в диссертации исследования раскрыты в опубликованных автором научных работах. Результаты, полученные автором, опубликованы в основном в ведущих отечественных журналах, были представлены и обсуждены на российских и международных конференциях.

Результаты диссертации прошли верификацию с помощью сравнения с независимыми данными.

Таким образом, достоверность результатов диссертации не вызывает сомнений.

Соответствие автореферата диссертации

Автореферат правильно отражает содержание диссертации, написан понятным языком, хорошо организован и наглядно отражает основные результаты.

Замечания по диссертационной работе

1. Основное замечание по диссертационной работе – бóльшая часть исследований проведена еще в двадцатом веке. Это касается в основном экспериментальных результатов. Но и в обзорной части работы не затронуты некоторые важные вопросы. Например, в обзоре не упомянуты работы по результатам GPS – томографии тропосферы, которых к настоящему времени опубликовано значительное количество по результатам экспериментов в различных регионах Земли, и они дают богатый материал о мезомасштабных неоднородностях индекса рефракции дециметровых радиоволн в тропосфере, их высотной структуре (см. например: A. Flores et al. *Ann. Geophys.* 2000). К современным методам прогноза условий распространения радиоволн можно также отнести использование данных реанализа (см. например: J. Z. Kalita et al., *Artificial Satellites*, 2014). Не хватает в обзоре современных зарубежных работ по моделированию распространения радиоволн над морской поверхностью (см. например: Y. LEE et al. *Radioengineering*, 2014).
2. В экспериментах распространения радиоволн над сушей параметр профиля скорости ветра рассчитывается на уровнях 0,25, 0,5, 2,0 и 8 м, которые,

по моему мнению, не позволяют адекватно оценить реальный профиль скорости ветра в приземном слое. Все эти уровни слишком близки подстилающей поверхности, которая, собственно, и оказала основное воздействие на результаты эксперимента. Кроме того, степенной параметр профиля скорости ветра сам сильно зависит от стратификации атмосферы и типа подстилающей поверхности. Таким образом, все это сильно затрудняет интерпретацию эксперимента.

3. В главе 5 при интерпретации эксперимента о флуктуациях фазового фронта радиоволн с частотой 2730 и 2780 МГц на тропосферных трассах построены гистограммы разности фаз радиосигнала, принятого разнесенными приемниками. На основании полученных гистограмм разности фаз для разных баз (Рис.5.2 и 5.3) делается вывод о том, что распределения на всех базах близки к нормальному закону без использования каких-либо статистических критериев проверки гипотезы о нормальности полученных распределений.
4. У некоторых рисунков и таблиц подписи не полны или не совсем точны, т.е. не всегда понятно, что на них представлено, в тексте пояснения присутствуют. См., например: Рис. 1.2 (написано «Корреляционные функции синоптических неоднородностей давления и температуры» вместо «Усреднённые пространственные корреляционные функции давления и температуры [29,30]»); Рис. 4.7 (написано «Структурная схема устройств, использованных на Каспийском море» вместо («Структурная схема устройства двухканальной регистрации амплитуды радиосигналов»); Рис. 5.8 (написано «Коррелированные флуктуации угла прихода на двух разнесённых в пространстве угломерах» вместо «Синхронные флуктуации угла прихода на двух разнесённых в пространстве угломерах дата эксперимента»); Таблица 5.2 (написано «Связь флуктуаций углов прихода и градиентов коэффициента преломления» вместо «Сопоставление флуктуаций углов прихода и градиентов коэффициента преломления»).
5. В работе отсутствует список обозначений и сокращений.

Приведенные замечания не затрагивают существа полученных результатов и не снижают ценности работы. Учет мезомасштабных процессов в задачах тропосферного распространения радиоволн все еще остается актуальной задачей.

Заключение

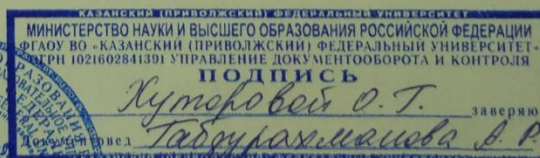
Диссертация Киселева Олега Николаевича «Оценка влияния мезомасштабных неоднородностей тропосферы на точность измерения углов и дальность действия пассивных радиолокационных систем» является законченным научно – исследовательским трудом. В диссертации Киселева О.Н. решена научная проблема улучшения точностных характеристик измерительных радиосистем за счет учета мезомасштабных неоднородностей в тропосфере, имеющая важное значение для радиофизики.

Основные выводы работы подтверждены ее содержанием. Полученные результаты достоверны, выводы и рекомендации вполне обоснованы.

Считаю, что диссертационная работа Киселева О.Н. «Оценка влияния мезомасштабных неоднородностей тропосферы на точность измерения углов и дальность действия пассивных радиолокационных систем» соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России, а Киселев Олег Николаевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 01.04.03- Радиофизика.

Профессор кафедры радиоастрономии
Института физики
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»,
доктор физико-математических наук
25.00.29 - Физика атмосферы и гидросферы
профессор по специальности «Радиофизика»
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18
Тел: +7 (917) 232-38-21
E-mail: Olga.khutorova@kpfu.ru

Хуторова Ольга
Германовна



[Handwritten signature]
Хуторова О.Т. заверяю
Табураткина В.Р.