

Тема КЛИМАТ. Изучение изменчивости климатических параметров и природные катастрофы разных масштабов: развитие и анализ физических механизмов, разработка современных методов обработки данных космического мониторинга климатических и экологических процессов. (Гос. Регистрация № 01.20.03 03440).

Научные руководители темы: д.т.н. Е.А. Лупян, д.ф.-м.н., профессор Е.А. Шарков

Исследование генерации зонального ветра в атмосферах планет. Изучение цепочек вихрей синоптического масштаба, формирующихся в зональном ветре в атмосфере Земли. Интерпретация цепочек вихрей, наблюдаемых со спутников над акваториями Мирового океана

Изучение крупномасштабных вихрей и зональных ветров привлекает особое внимание исследователей, так как именно эти структуры определяют глобальный перенос воздушных масс, формирующих погоду и климат обширных регионов. Циркуляция земной атмосферы, усредненная по большим пространственным (несколько сотен километров) и временным масштабам (несколько суток), характеризуется вихрями в виде нелинейных волн Россби. Одной из основных особенностей волн Россби является присущая им самоорганизация, проявляющаяся в спонтанной генерации в мелкомасштабно турбулентной атмосфере крупномасштабных когерентных структур, таких как крупномасштабные вихри и зональные ветры. В свою очередь, с существованием сдвиговых зональных ветров связан механизм генерации фронтальных синоптических вихрей. Как показывают метеорологические наблюдения и данные спутникового мониторинга, неустойчивый зональный ветер генерирует меандры с масштабом от нескольких сотен до тысяч километров. Отсекаемые от зональных ветров меандры трансформируются в циклонические и антициклонические вихри. В долгоживущих синоптических вихрях происходит захват вещества, которое переносится с вихрями на большие расстояния. Это свойство определяет их важную роль в динамике распределения среднесуточного давления, температуры, скорости ветра и др.

Выяснение деталей усиления и выбор соответствующего механизма неустойчивости на разных этапах развития крупномасштабных циклонов требует новых спутниковых наблюдений, а также новых аналитических исследований. К наиболее сильным гидродинамическим неустойчивостям, которые могут быть ответственны за генерацию и дальнейшую эволюцию вихрей, можно отнести: взаимодействие волн Россби с инерционно-гравитационными волнами, вращательная неустойчивость, неустойчивость волн Россби в сдвиговом зональном потоке.

Онищенко О.Г., Похотелов О.А., Астафьева Н.М., Адушкин В.В. Генерация зональных ветров и планетарных вихрей в системе термосфера – ионосфера Земли // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. М.: Изд. РАН, 2010. С. 320–325.

Онищенко О.Г. Генерация крупномасштабных циклонических вихрей в приэкваториальной атмосфере // 8-я Всерос. открытая конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010 г.: Тез. конф. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 141.

Астафьева Н.М., Раев М.Д., Онищенко О.Г. Всплески энергии (скрытого тепла или водяного пара) в тропическом циклоне по данным микроволнового спутникового мониторинга [Электрон. ресурс] // 8-я Всерос. открытая конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010 г. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 136. Режим доступа: <http://d902.iki.rssi.ru/theses/cgi/thesis.pl?id=2038>.

Астафьева Н.М., д-р физ.-мат. наук, ast@iki.rssi.ru, Онищенко О.Г., д-р физ.-мат. наук, отдел № 55

Разработка комплексных методик и создание программ для обработки данных спутникового мониторинга (глобальных радиотепловых полей) с целью изучения структуры и устойчивости зональных потоков в атмосфере Земли

Структура межгодовых колебаний тропосферы Земли изучается на основе данных микроволнового спутникового мониторинга — ежесуточных глобальных радиотепловых полей Земли из электронной коллекции GLOBAL-Field, <http://www.iki.rssi.ru>. Межгодовые колебания в тропосфере, в особенности квазидвухлетние колебания (КДК) наиболее значимая из высокочастотных квазирегулярных компонент межгодовых изменений атмосферы и климатической системы. КДК проявляются в структуре полей климатических параметров, в частности, полей зонального ветра, полей распределения озона, температуры, давления, облачности и поэтому могут отображать как глобальные климатические изменения, так и локальные структурные особенности климатической системы Земли. Впервые обнаружены КДК радиотеплового поля Земли и проведено предварительное изучение широтно-временной структуры этих колебаний. Сравнение результатов изучения межгодовых изменений радиотеплового поля над Атлантическим океаном, полученных методом широтно-временных диаграмм за период 1999–2006 гг. (для 30- и 60-градусных широтных поясов) и на основе математического аппарата вейвлет-преобразования за период 1996–2004 гг. (для 5-градусных широтных поясов) показывает наличие одно- и разнофазных квазидвухлетних и квазичетырехлетних колебаний в разных широтных поясах радиотеплового поля, а также в переходных областях. Результаты, полученные на основе двух разных методик, хорошо согласуются, что говорит о наличии КДК в тропосфере над Атлантикой. Выявлены различия структуры КДК на разных широтах. КДК радиояркостной температуры наблюдаются в диапазонах широты 5–20° с. ш., 25–45° с. ш. и 15–35° ю. ш. (на двух последних колебания однофазные). Квазичетырехлетние колебания наблюдаются на широтах 5° с.ш. – 10° ю. ш. Показано, что бо́льший вклад в зонально осредненную картину широтного пояса 0–60° в северной и южной Атлантике дают низкие широтные пояса (0–30°). Полученная широтная структура КДК радиотеплового поля согласуется с имеющимися в литературе результатами изучения КДК другими методами и на основе других данных наблюдений, а также с представлениями о структуре общей циркуляции атмосферы.

Астафьева Н.М., Хайруллина Г.Р. Проявление некоторых климатических тенденций в структуре радиотеплового поля над Атлантикой // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 41–48.

Астафьева Н.М. Прогноз развития Эль-Ниньо по данным микроволнового спутникового мониторинга // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 4. С. 3–10.

Астафьева Н.М., Раев М.Д. Влияние крупномасштабного удаленного атмосферного окружения на траектории тропических циклонов // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Т. 7. М.: ДоМира, 2010. № 1. С. 61–74.

Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания в структуре радиотеплового поля над Атлантическим океаном по данным микроволнового спутникового мониторинга // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Т. 7. М.: ДоМира, 2010. № 3. С. 53–61.

Астафьева Н.М. Циркуляция атмосферы Земли (зональные потоки, вихри и волны) и климатические тенденции по данным спутникового мониторинга // Международ. конф. «Нелинейные задачи теории гидродинамич. устойчивости и турбулентность». Москва, МГУ, ИМехМГУ, 1–7 февр. 2010.

Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания радиотеплового поля над Атлантикой по данным микроволнового спутникового мониторинга, характеризующим влагозапас тропосферы // 7-я Конф. молодых ученых, посвященная Дню космонавтики, «Фундамент. и приклад. космич. исслед.». Москва, ИКИ РАН, 12–13 апр. 2010. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 65.

Астафьева Н.М. Возможные причины горячего российского лета 2010-го -Ниньо 2009 и межполушарные атмосферные колебания // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 139.

Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Широтно-временная структура квазидвухлетних колебаний радиотеплового поля и стратосферного среднего зонального ветра в тропической зоне // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 177.

Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М., Раев М.Д. Методика широтно-временной диаграммы для изучения пространственно-временной структуры радиотеплового поля Земли // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 34.

Астафьева Н.М., д-р физ.-мат. наук, ast@iki.rssi.ru, отд. № 55

Поиск ионосферного параметра, оптимально отражающего состояние ионосферы экваториальных и низких широт под воздействием тропических циклонов. Анализ данных наземного ионосферного зондирования и спутникового мониторинга тропического циклогенеза

Основные научные результаты этапа работы за 2010 г. были представлены на конференциях: “10th EMS Annual Meeting / 8th European Conference on Applied Climatology (ЕСАС)” 13–17 сентября 2010 г. в Цюрихе (Швейцария) и 8-я открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, Москва, 15–19 ноября 2010 г.

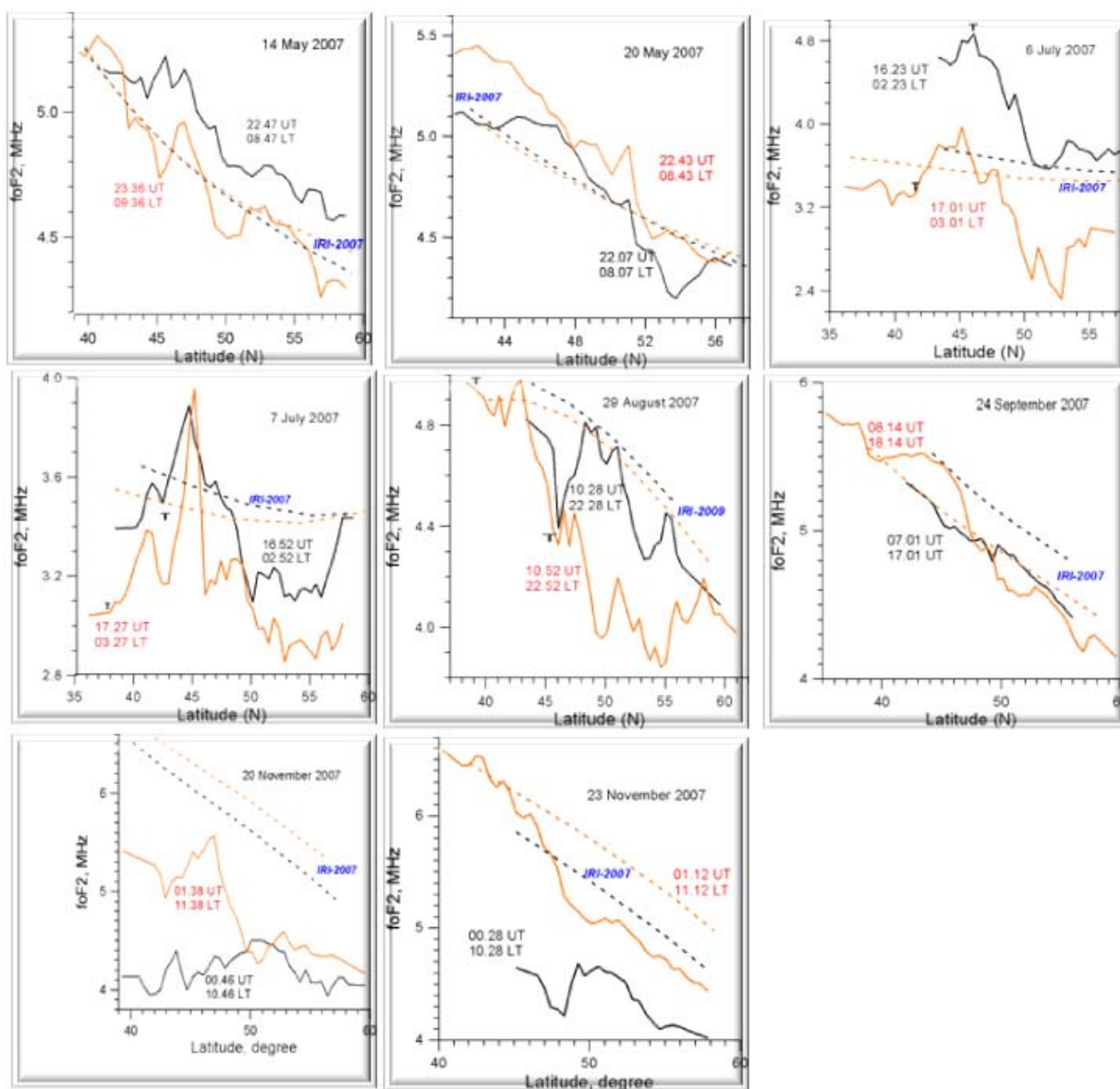
В качестве исследуемого параметра был выбран параметр foF2 – критическая частота слоя F2. Как известно, foF2 является наиболее высокой частотой, отраженной от ионосферного слоя F2 при вертикальном зондировании. Выбор параметра связан с тем, что для нас наибольший интерес представлял анализ слоя F2.

В работе анализируются данные томографического зондирования за 2007 г., которое проводилось над тремя пунктами, расположенными на одном меридиане: Южно-Сахалинск (47° N, 143° E), Поронайск (49° с. ш., 143° в. д.) и Ноглики (52° с. ш., 143° в. д.) в целях поиска возможного влияния тропического циклона ТЦ на верхнюю ионосферу. В условиях важности использования GPS, в основе которых применяются ионосферные модели, необходимо уточнение влияния различных факторов на ионосферу. Это особенно важно для восточных пограничных регионов страны, которые достаточно близко расположены с очагами зарождения и действия ТЦ.

Использование метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных спутниковых навигационных систем позволяет выявлять вариации ионосферных параметров вызванных распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Полученные результаты свидетельствуют о том, что после нескольких суток действия ТЦ наблюдается понижение значений критической частоты слоя F2 на расстоянии около 3000 км от очага возмущения по горизонтали (в долготном направлении). Также вблизи зоны действия ТЦ (по долготе) и на протяжении 1–2 сут может наблюдаться повышение значений foF2. Сложности морфологического анализа данного явления заключаются в том, что ТЦ является «широкополосным» и длительным источником возмущения.

Возможным откликом верхней ионосферы, локализующейся над зоной тропического циклона (в данном случае на 25–30° севернее и 5–20° восточнее) на расстоянии приблизительно от 3800 до 5500 км, является изменение ее параметра foF2 в среднем не более чем на 10–20 %. Тем не менее, это является значительным откликом на таких расстояниях от источника возмущения. Уменьшение или, наоборот, повышение foF2 связано с «задержкой» момента измерений по отношению к началу действия ТЦ.

Данные выводы были сделаны на основе представленных ниже рисунков, которые содержат в себе информацию после проведенной необходимой выборки. На рисунках представлены широтные зависимости параметра foF2 (143° в. д.), а также время и даты проведенных съемок. Также приведены модельные кривые (IRI-2007).



Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Сравнение величин foF2 в дневное время и после захода Солнца // Геомагнетизм и аэронавигация. 2010. Т. 50. № 1. С. 61.

Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Параметры ионосферного слоя F2 как источник информации о трендах динамики термосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 50. №. 2. С. 195. 2010.

Данилов А.Д., Ванина-Дарт Л.Б. Поведение foF2 и hmF2 после захода Солнца // Геомагнетизм и аэронавигация. 2010. Т. 50. № 6. (В печати.)

Ванина-Дарт Л.Б., Романов А.А., Шарков Е.А., Влияние тропического циклона на верхнюю ионосферу по данным томографического радиозондирования над о-вом Сахалин // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Т. 7. М.: ДоМира, 2010. № 1. С. 173–189.

Vanina-Dart L.B., Romanov A.A., Sharkov E.A. Response of the Lower and Higher Ionosphere to Strong Tropospheric Disturbances // EMS Annu. Meet.: Abstr. 2010. V. 7. N. EMS2010-723.

Vanina-Dart L.B., Romanov A.A., Sharkov E.A. Tropical Cyclone Influence on the Higher Ionosphere from Tomography Sounding Data over Sakhalin Island // EMS Annu. Meet.: Abst. 2010. V. 7. N. EMS2010-697.

Ванина-Дарт Л.Б., Романов А.А., Шарков Е.А. Вариации ионосферного слоя F2 под влиянием тропического циклона по данным радиозондирования // 8-я Всерос. открытая ежегод. конф. «Современ.

проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва, ИКИ РАН, 15–19 нояб. 2010: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 321.

Ванина-Дарт Л. Б., канд. физ.-мат. наук, vandart@iki.rssi.ru, Шарков Е.А., д-р физ.-мат. наук, e.sharkov@mail.ru, отд.55

Формирование научной базы данных глобального тропического циклогенеза за 2005–2010 гг. на основе специального препроцессинга исходных «сырых» данных в контексте задач изучения изменчивости климатических параметров планеты

Сформирована научная база данных глобального тропического циклогенеза за 2005–2010 гг. на основе специального препроцессинга исходных «сырых» данных для задач изучения изменчивости климатических параметров планеты.

Блок базы данных за 2005–2009 гг. сформирован на основе ежесуточной информации, полученной по каналам Интернет с сайта Астрономической обсерватории Гавайского университета (URL <http://www.solar.ifa.hawaii.edu/>), где поступающая первичная информация из JTWC (Флорида) и региональных метеоцентров (Токио, Майами, Нью-Дели, Дарвин, о-в Фиджи, о-в Реюньон и др.) суммировалась и поступала в систему Internet в виде ежедневных пакетов данных. Этот блок информации обладает существенно большей полнотой описания событий, происходящих в тропической зоне Мирового океана, чем информация за 1983–1996 гг.

На основе представленной информации были изучены стохастические режимы генерации и эволюции глобального тропического циклогенеза и выявлены особенности региональных тропических циклогенезов в поле поверхностной температуры Мирового океана.

Шарков Е.А., Покровская И.В. Региональные тропические циклогенезы в поле поверхностной температуры Мирового океана //Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 54–62.

Покровская И.В., отд. № 55

Накопление данных космического мониторинга, полученных в рамках программы DMSP за 2008–2009 гг.

Сформированный ранее архив данных микроволнового зондирования планеты за 2005–2008 гг. пополнен данными 2009 г. Проводилось накопление данных за 2010 г. Архив постоянно пополняется и используется для построения глобальных радиотепловых полей планеты. Продолжалась разработка комплексных методик обработки многолетних данных многоканального радиотеплового зондирования Земли приборами SSM-I, предназначенных для изучения термодинамических процессов в системе океан–атмосфера. Методики, которые позволят получить поля завихренности в отдельных регионах тропической зоны на основе глобальных радиотепловых полей Земли из электронной коллекции GLOBAL-Field, созданной в отделе № 55 ИКИ по данным микроволнового спутникового мониторинга в рамках программы DMSP, находятся в процессе разработки. Методики будут использованы, в частности, для изучения устойчивости зональных потоков в атмосфере Земли, а также для исследования физических основ формирования необходимых геофизических критериев генезиса тропических циклонов.

Раев М.Д., канд. физ.-мат. наук, зав. лаб., mraev@iki.rssi.ru, отд. № 55

Изучение свойств различных природных сред для адекватного анализа данных спутникового мониторинга. Экспериментальное и теоретическое исследование взаимодействия электромагнитных волн микроволнового диапазона с горными породами, содержащими рудные минералы. Разработка, метода определения полезной компоненты из спектральных измерений отражательной и пропускательной способности образца породы. Создание электродинамической модели диэлектрических свойств горных пород, содержащих рудные минералы

Исследованы полученные ранее частотные зависимости действительной и мнимой части комплексного показателя преломления (n' и n'') ряда рудных минералов. Объяснены осцилляции экспериментальных значений отражательной (R) и пропускательной (T) способности образцов минералов в диапазоне частот 77–145 ГГц. Полученные результаты подтвердили достоверность аппроксимационных выражений n' и n'' минералов.

Результаты расчета в диапазоне частот 12–38 ГГц для двух минералов, представлены рис. 1, из которого видно, что расчетные зависимости R и T минералов от частоты излучения хорошо соответствуют экспериментальным данным.

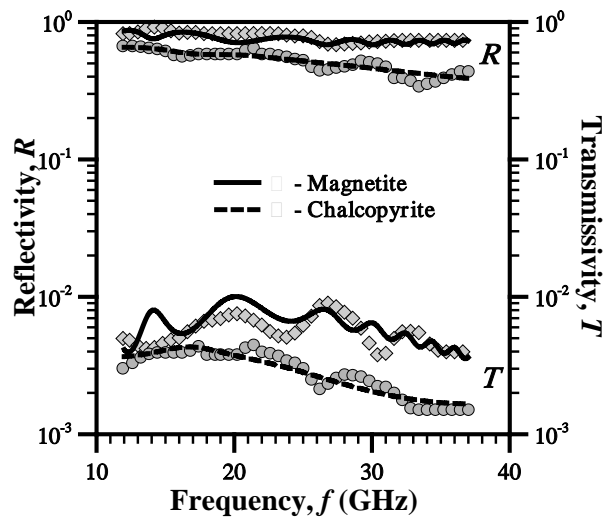


Рис. 1. Частотные зависимости $R(f)$ и $T(f)$ в диапазоне частот 12–38 GHz для образцов двух минералов. Символы — эксперимент, линии — расчет. Толщина образцов: *magnetite* — 0,55 см; *chalcopyrite* — 0,57 см

Сопоставление экспериментальных значений и расчетных зависимостей $R(f)$ и $T(f)$ в диапазоне частот 77–145 ГГц для четырех минералов представлено на рис. 2, из которого видно, что расчетные зависимости совпадают с экспериментальными значениями. Однако расчетные зависимости представляют собой плавные кривые (за исключением сфалерита), тогда как экспериментальные имеют ярко выраженный осциллирующий вид.

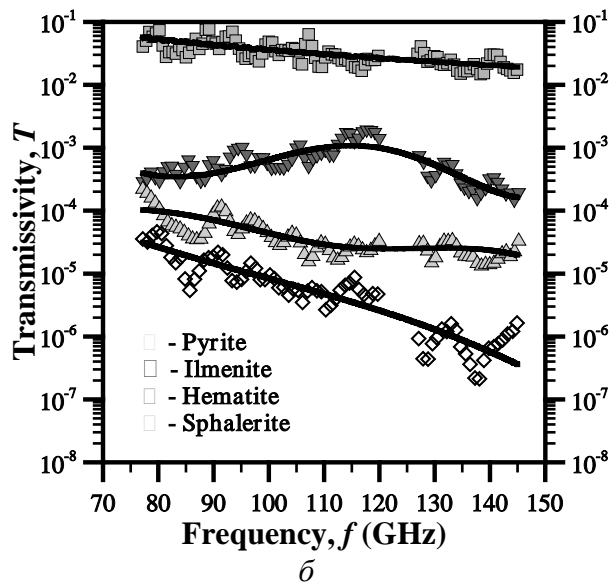
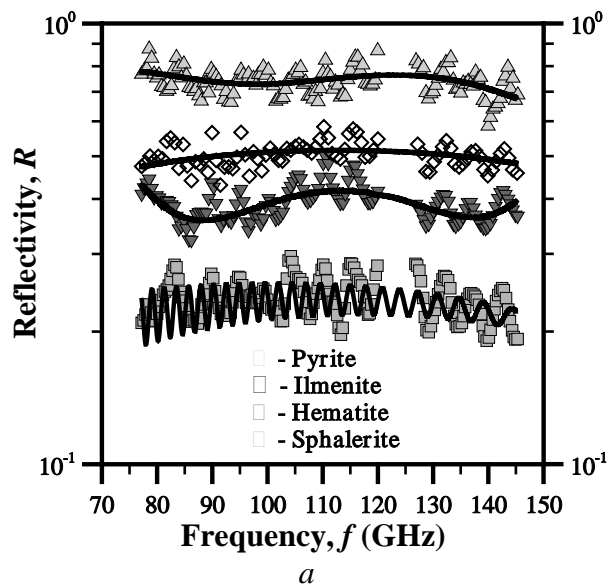


Рис. 2. Частотные зависимости $R(f)$ (а) и $T(f)$ (б) в диапазоне 77–145 ГГц для образцов четырех минералов. Символы — эксперимент, линии — расчет. Толщина образцов: *pyrite* — 1,275 см; *ilmenite* — 2,01 см; *hemahematite* — 1,98 см; *sphalerite* — 1,963 см

Неполное совпадение рассчитанных частотных зависимостей $R(f)$ и $T(f)$ с экспериментальными результатами объясняется тем, что исследуемые образцы не являлись однородным минералом, а представляли собой сростки кристаллов рудного минерала, разделенных тонкими прослойками (≤ 1 мм), состоящими из нерудных минералов. Схема такой среды показана на рис. 3, где светлые области — это кристаллы рудного минерала, а темные прожилки — мелкозернистая фракция нерудных минералов.

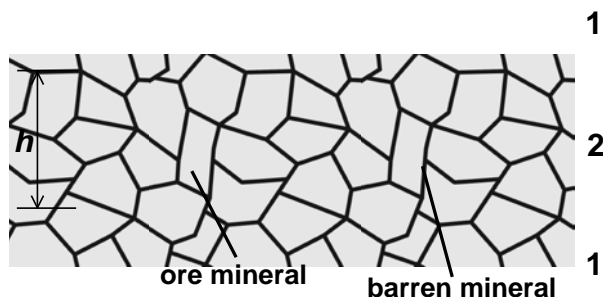


Рис. 3. Схематический вид исследуемых образцов

В первом приближении такую среду можно представить многослойной структурой, где слой рудного минерала чередуется с очень тонким слоем нерудного минерала. Поглощение в слоях рудного минерала велико, поэтому отражательная способность образца будет определяться отражением излучения от границ первых двух слоев структуры — слоя рудного и слоя нерудного минералов. Вклад в отражательную способность отражения излучения от границ других слоев будет незначителен и его можно не учитывать. Величина пропускательной способности такой среды определяется пропусканием излучения всех слоев и переотражением от границ последних двух слоев. Переотражение излучения от границ остальных слоев не окажет существенного влияния на значение T из-за сильного поглощения в рудном минерале. Таким образом, для расчета R и T образцов необходимо рассмотреть задачу отражения и пропускания излучения трехслойной средой, показанной на рис. 4:

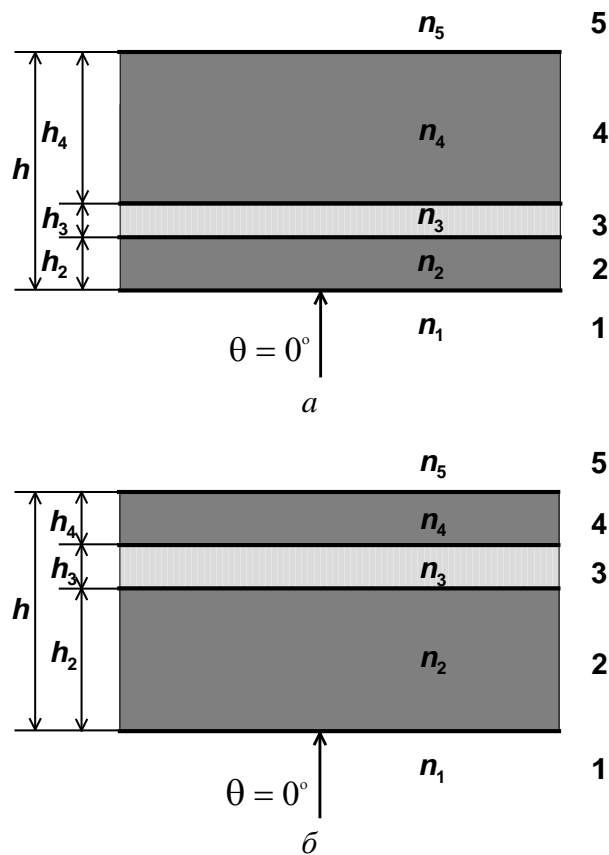


Рис. 4. Схема задачи для расчета R (а) и T (б).

На рис. 4: среда 1 и 5 — вакуум с показателем преломления $n_1 = n_5 = 1$; среда 2 и 4 — слои рудного минерала толщиной h_2 и h_4 с комплексным показателем преломления $n_2 = n_4$; среда 3 — слой нерудного минерала толщиной h_3 и комплексным показателем преломления n_3 ; толщина всего образца — $h = h_2 + h_3 + h_4$. На рис. 4а представлена схема задачи для расчета отражательной способности R исследуемых образцов. Здесь средой 4 заменены все последующие слои рудного и нерудного минералов, лежащие за слоями 1 и 2. На рис. 4б представлена схема задачи для расчета пропускательной способности T исследуемых образцов. Здесь средой 2 заменены все предыдущие слои рудного и нерудного минералов, лежащие перед предпоследним и последним слоями (слои 3 и 4).

Отражательная R и пропускательная T способность многослойной плоскопараллельной среды, находящейся в вакууме, при условии падения излучения на поверхность среды под углом $\theta = 0^\circ$ определяется из следующих выражений [1]:

$$R = |r|^2, \quad r = \frac{M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22}}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}}; \quad (1)$$

$$T = |t|^2, \quad t = \frac{2}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}};$$

где r — коэффициент отражения слоистой среды; t — коэффициент пропускания слоистой среды; M_{11} , M_{12} , M_{21} , M_{22} — элементы характеристической матрицы слоистой среды. Характеристическая матрица слоистой среды $M(h)$ определяется, как произведение характеристических матриц каждого слоя [1]. Для нашего случая:

$$M(h) = M_2(h_2)M_3(h_3)M_4(h_4) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $M_2(h_2)$, $M_3(h_3)$ и $M_4(h_4)$ — характеристические матрицы соответствующего слоя. Характеристическая матрица отдельного слоя, для рассматриваемой задачи, запишется как [1]:

$$M_k(h_k) = \begin{bmatrix} \cos \beta_k & \frac{-i}{n_k} \sin \beta_k \\ -in_k \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\beta_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k h_k$, λ — длина волны излучения; n_k и h_k — комплексный показатель преломления и толщина слоя; k — номер соответствующего слоя (см. рис. 4). Используя (3), найдем из (2) элементы характеристической матрицы трехслойной среды, представленной на рис. 4. Подставив найденные M_{11} , M_{12} , M_{21} , M_{22} в (1), определим выражения для коэффициента отражения r_3 и коэффициента пропускания t_3 трехслойной среды:

$$r_3 = \left(r_{12} + r_{23} e^{2i\beta_2} + r_{34} e^{2i(\beta_2+\beta_3)} + r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_3+\beta_4)} + r_{12} r_{23} r_{34} e^{2i\beta_3} + \right. \\ \left. + r_{12} r_{23} r_{45} e^{2i(\beta_3+\beta_4)} + r_{12} r_{34} r_{45} e^{2i\beta_4} + r_{23} r_{34} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_4)} \right) \times \\ \times \left(1 + r_{12} r_{23} e^{2i\beta_2} + r_{23} r_{34} e^{2i\beta_3} + r_{34} r_{45} e^{2i\beta_4} + r_{12} r_{34} e^{2i(\beta_2+\beta_3)} + \right. \\ \left. + r_{23} r_{45} e^{2i(\beta_3+\beta_4)} + r_{12} r_{23} r_{34} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_4)} + r_{12} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_3+\beta_4)} \right)^{-1}, \quad (4)$$

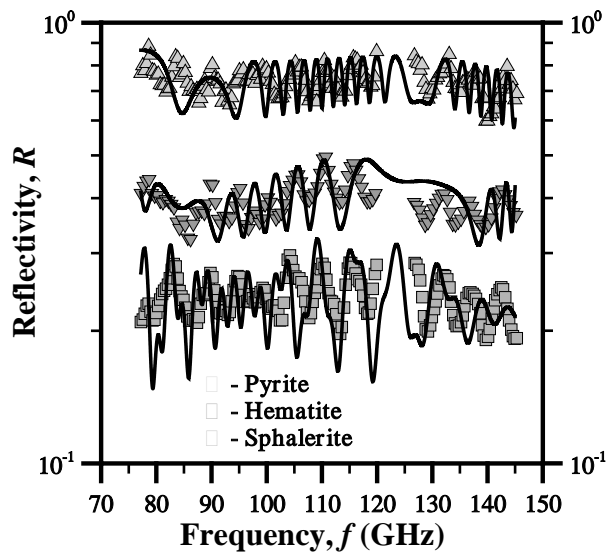
$$t_3 = \left(t_{12} t_{23} t_{34} t_{45} e^{i(\beta_2+\beta_3+\beta_4)} \right) \times \\ \times \left(1 + r_{12} r_{23} e^{2i\beta_2} + r_{23} r_{34} e^{2i\beta_3} + r_{34} r_{45} e^{2i\beta_4} + r_{12} r_{34} e^{2i(\beta_2+\beta_3)} + \right. \\ \left. + r_{23} r_{45} e^{2i(\beta_3+\beta_4)} + r_{12} r_{23} r_{34} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_4)} + r_{12} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_3+\beta_4)} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где $r_{k,k+1} = \frac{n_k - n_{k+1}}{n_k + n_{k+1}}$ — коэффициент отражения от границы раздела между средой k и средой $k+1$; $t_{k,k+1} = \frac{2n_k}{n_k + n_{k+1}}$ — коэффициент пропускания границы раздела между средой k и средой $k+1$; $k = 1, 2, 3, 4$.

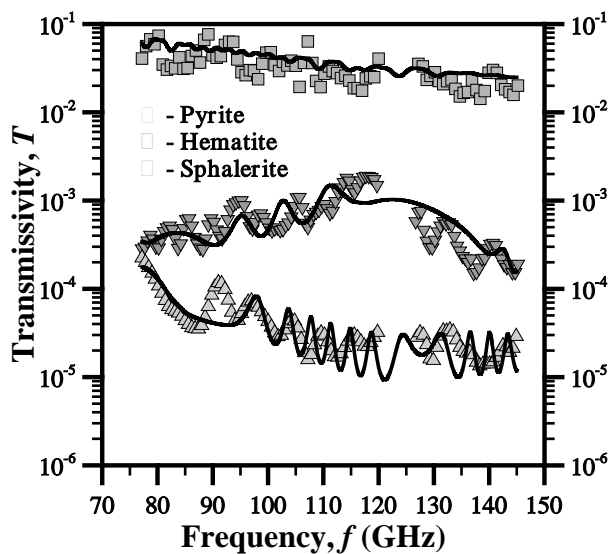
Выражения (4) и (5) были использованы для расчета R и T исследуемых минеральных образцов. При расчете n' и n'' минералов определялись из полученных ранее аппроксимационных выражений. Толщина слоев (h_2 , h_3 , h_4) для каждого образца выбирались произвольно, однако в соответствии с реально возможными значениями [2].

Поскольку диэлектрические характеристики большинства нерудных минералов схожи между собой [2–4], то в качестве нерудного минерала нами был выбран кварц, n' и n'' которого хорошо известны в широком диапазоне частот [2–5]. Отражательная способность образцов определялась из схемы, показанной на рис. 4а, а пропускательная способность — из схемы рис. 4б. Расчеты были выполнены для всех минеральных образцов. Сопоставление рассчитанных зависимостей $R(f)$ и $T(f)$ в диапазоне 77–145 ГГц с экспериментальными значениями показало их хорошее соответствие.

На рис. 5 показаны результаты сопоставления рассчитанных, с помощью (4) и (5), частотных зависимостей $R(f)$ и $T(f)$ с экспериментальными данными для трех минералов. Расчет R был выполнен при следующих параметрах образцов: *pyrite* — $h_2 = 0,25$ см, $h_3 = 0,02$ см, $h_4 = 1,005$ см; *hematite* — $h_2 = 0,46$ см, $h_3 = 0,01$ см, $h_4 = 1,51$ см; *sphalerite* — $h_2 = 0,74$ см, $h_3 = 0,15$ см, $h_4 = 1,073$ см. Расчет T был выполнен при следующих параметрах образцов: *pyrite* — $h_2 = 1,02$ см, $h_3 = 0,008$ см, $h_4 = 0,147$ см; *hematite* — $h_2 = 1,64$ см, $h_3 = 0,11$ см, $h_4 = 0,23$ см; *sphalerite* — $h_2 = 0,74$ см, $h_3 = 0,15$ см, $h_4 = 1,073$ см. Как видно из рисунка, рассчитанные зависимости хорошо совпадают с экспериментальными данными.



a



б

Рис. 5. Частотные зависимости $R(f)$ (а) и $T(f)$ (б) в диапазоне 77–145 ГГц для образцов трех минералов. Символы — эксперимент, линии — расчет из (4) (а) и (5) (б). Толщина образцов: *pyrite* — 1,275 см, *hematite* — 1,98 см, *sphalerite* — 1,963 см

Таким образом, осциллирующий вид экспериментальных частотных зависимостей $R(f)$ и $T(f)$ в диапазоне 77–145 ГГц связан с неоднородностью структуры исследуемых образцов — наличием внутренних границ раздела сред. Выражения, используемые в расчетах ранее, были получены для однородного слоя среды. Поскольку все образцы (кроме сфалерита) сильно поглощают излучение, а толщина их $h \gg \lambda$, то переотражение излучения от противоположной границы образца практически не влияет величину R и T . Поэтому расчетные зависимости $R(f)$ и $T(f)$ в диапазоне 77–145 ГГц, полученные ранее, имеют вид плавных кривых (см. рис. 2).

В диапазоне 12–38 ГГц толщина образцов $h < \lambda$, а толщина прослоек нерудных минералов $h_3 \ll \lambda$. В этом диапазоне образцы можно считать однородными и расчет R и T , полученный ранее, практически совпадает с экспериментальными данными (см. рис. 1).

Схема задачи, показанная на рис. 4, является приближением реальной структуры образцов (см. рис. 3). В минеральных образцах толщины слоев рудных минералов и прослоек нерудных минералов не постоянны, а слои имеют разрывы (см. рис. 3). Помимо этого некоторые границы раздела сред внутри образца могут быть не параллельны внешним границам. Этим и объясняется небольшое различие теоретических и экспериментальных частотных зависимостей $R(f)$ и $T(f)$ (см. рис. 3 и 5).

Нетрудно также показать, что при $h_3 \rightarrow 0$ (см. рис. 4), выражения (4) и (5) переходят в уравнения для однослойной среды. Поскольку величина примесей нерудных минералов в образцах не превышала 10 %, а $h_3 \ll h$, то полученные аппроксимационные частотные зависимости n' и n'' для рудных минералов можно считать с высокой степенью достоверными.

Работа выполняется совместно с Учебно-научным радиофизическим центром Московского педагогического государственного университета (УНРЦ МПГУ).

1. *Born V., Wolf E.* Principles of Optics. Pergamon, Oxford, 1964.
2. *Battey M.H., Pring A.* Mineralogy for Students. Longman, Newcastle, 1997.
3. Handbook of Physical Constants // Ed. Clark-Jr. S.P. Yale University, New Haven, Connecticut. The Geological Society of America, Inc. Memoir 97, 1966.
4. Mineral Physics and Crystallography: a Handbook of Physical Constants / Ed. Thomas J. Ahrens., The American Geophysical Union, 1995.
5. *Clark Roger N.* Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. John Wiley and Sons, Inc. N. Y., 1999.

Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Polyakova O.N., Dzardanov A.L., Gol'tsman G.N. Radiophysical and Dielectric Properties of Ore Minerals in 12–145 GHz Frequency Range // Progress in Electromagnetics Research B. 2010. V. 25. P. 349–367.

Тихонов В.В., канд. физ.-мат. наук, vtikhonov@asp.iki.rssi.ru, Боярский Д.А., канд. физ.-мат. наук, отд. № 55

Разработка методики определения запасов воды в снежном покрове по данным многочастотной микроволновой спутниковой радиометрии. В исследованиях будут использованы спутниковые данные прибора SSM/I программы DMSP, а также данные наземных наблюдений за снежным покровом, полученные в результате снегосъемок в окрестностях метеорологических станций, расположенных в Европейской части России. Методика определения снегозапаса будет создана на основе моделей микроволнового излучения снежного покрова

Продолжено пополнение базы наземных данных по снежному покрову для Европейской части России.

Проведен анализ различных моделей излучения снежного покрова.

Выделены диапазоны величин метеорологических параметров, при которых величина снеготолщины, рассчитанная на основе спутниковых измерений микроволнового излучения, наиболее приемлема для мезо- и макромасштабных оценок состояния поверхности в зимний период.

Формируется база данных сезонных изменений снеготолщины и температуры воздуха Севера Европы. На основе стандартных метеорологических наблюдений рассчитаны месячные приросты температуры воздуха и высоты снежного покрова в узлах регулярной сетки $1 \times 1^\circ$ для осенне-зимних месяцев (ноябрь–апрель) периода 1982–2009 гг. Территория: Северная Европа – Скандинавия и север Восточно-Европейской равнины севернее 60° с. ш. Полученные результаты записываются в виде электронных таблиц и карт, адаптированных для верификации спутниковых радиояркостных температур прибора SSM/I программы DMSP.

Модельные расчеты радиояростной температуры были проведены для зимних сезонов 2001–2008 гг. для нескольких участков, находящихся вблизи наземных метеостанций, расположенных в северной части Восточно-Европейской равнины.

Выделены диапазоны величин метеорологических параметров, при которых величина снеготолщины, рассчитанная на основе спутниковых измерений микроволнового излучения, наиболее приемлема для мезо- и макромасштабных оценок состояния поверхности в зимний период. Многолетние изменения наблюдаемых и восстановленных снеготолщин существенно различаются — в многоснежные месяцы вплоть до разного знака коэффициентов линейных трендов. Увеличение в процессе потепления осадков и низкие температуры воздуха обуславливают стабильные наблюдаемые снеготолщины региона. Но многолетнее увеличение количества дней с положительными температурами и соответственно оттепелей не могут не вызывать изменения структуры снежной толщи — увеличения от года к году количества льдистых включений. В результате величина восстановленных снеготолщин в многолетнем аспекте снижается. В разбросе их значений для всей совокупности данных интерес могут представлять те значения, погрешность которых по отношению к наблюдаемым величинам не превышает 30 %. Корреляция для соответствующих значений этого диапазона восстановленных и наблюдаемых данных оказалась высокой — коэффициент 0,99. Пары значений с различными диапазонами погрешностей могут формироваться в сходных метеорологических условиях. В этом случае важно выявить метеорологические условия, при которых имеет место та или иная погрешность восстановленных данных. В частности, от температуры воздуха зависят изменения высоты и структура снежной толщи, влияющие в свою очередь на взаимодействие снежного покрова с микроволновым излучением. Таким образом, изменчивость восстановленных по наблюдениям микроволнового излучения снеготолщин может быть связана с изменением температуры.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (проект № 09-05-01060 совместно с Институтом географии РАН — «Разработка методики определения запасов воды в снежном покрове по данным многочастотной микроволновой спутниковой радиометрии»; руководитель: ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук *Боярский Д.А.*)

Тихонов В.В., канд. физ.-мат. наук, vtikhonov@asp.iki.rssi.ru, Боярский Д.А., канд. физ.-мат. наук, отд. № 55