

На правах рукописи



Мателенок Игорь Владимирович

**МОНИТОРИНГ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ АРКТИКИ СПУТНИКОВЫМ
СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2015

Работа выполнена на кафедре инноватики и интегрированных систем качества Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель:

Мелентьев Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Лебедев Герман Андреевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Шубина Марина Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры информационных систем и технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский лесотехнический университет им. С.М.Кирова»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук» (НИЦЭБ РАН)

Защита состоится 7 апреля 2015 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.233.01 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», а также на сайте университета <http://dissov.guap.ru>

Отзывы просим присылать в 2-х экземплярах с заверенной подписью по адресу 190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67, ГУАП, канцелярия.

Автореферат разослан _____

« _____ » февраля 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.233.01,
доктор технических наук, профессор

 Шелест Д. К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Согласно Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года, одной из приоритетных задач для охраны окружающей среды и устойчивого развития территорий российского сектора Арктики является совершенствование системы государственного экологического мониторинга с использованием современных средств наблюдения наземного, авиационного и космического базирования. Повсеместное распространение в Арктике многолетнемерзлых грунтов (ММГ), в современных климатических условиях находящихся в состоянии квазиустойчивого равновесия, требует применения специальных методов и средств контроля для своевременного обнаружения и прогноза опасных и экстремальных природных явлений, связанных с деградацией ММГ и переходом их в категорию сезонно-мерзлых грунтов (СМГ).

Сети геокриологических стационаров (ГКС) и гидрометеорологических станций (ГМС) не позволяют получать информацию о состоянии и изменчивости грунтов на значительных по площади территориях Арктики в силу ограниченного пространственного охвата. Задача решается с помощью спутниковой аппаратуры сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, обеспечивающей покрытие съемкой труднодоступных районов с необходимой периодичностью вне зависимости от погодных условий (благодаря наличию окон прозрачности атмосферы в СВЧ области электромагнитного спектра). Для мониторинга грунтов в региональном и глобальном масштабе в наибольшей степени подходят спутниковые СВЧ радиометры, важным преимуществом которых перед радарами с синтезируемой апертурой (РСА) является мультиспектральность, упрощающая решение обратных задач за счет снижения информационной неопределенности.

Мониторинг грунтов включает в себя наблюдения и контроль за их состоянием. Состояние ММГ, залегающих на глубинах, превышающих толщину скин-слоя, связано с состоянием поверхностных слоев грунтов, которое характеризуется термодинамической температурой, льдистостью, содержанием жидкой влаги, степенью минерализации поровых растворов и другими параметрами. Изменчивость состояния грунтов выражается временными показателями, рассчитываемыми на основе указанных параметров.

Вследствие высокой пространственной неоднородности и сложной динамики свойств грунтов в Арктике методология оценки изменчивости их состояния по спутниковым СВЧ радиометрическим данным к настоящему моменту недостаточно разработана. Методы оценки, предложенные в немногочисленных отечественных и зарубежных работах, различаются по используемым показателям изменчивости и подходам к восстановлению значений параметров состояния грунтов. Задачи восстановления значений параметров грунтов по СВЧ данным, относящиеся к классу некорректных, решаются с помощью алгоритмов, построенных на базе статистических (регрессионных) моделей и моделей собственного СВЧ излучения

многослойных сред. В периоды интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги решение таких задач многократно усложняется по сравнению с периодами стабильно мерзлого состояния грунтов, так как возрастает число факторов, детерминирующих СВЧ излучательные свойства грунтов. Существующие методы оценки не предусматривают дифференцированного подхода к восстановлению значений параметров состояния грунтов в эти периоды и не учитывают связи между последовательными состояниями СВЧ излучающей среды. Вследствие этого точность восстановления значений параметров состояния грунтов в Арктике, выражаемая отклонениями восстановленных значений от опорных значений, получаемых контактными методами на ГКС и ГМС, оказывается снижена в конце весны - начале лета или в зимние месяцы. Это приводит к увеличению ошибок оценки изменчивости состояния грунтов и ограничивает применимость спутниковой СВЧ радиометрии для решения задач мониторинга грунтов Арктики.

Другой проблемой является определение границ географических областей, в которых разрабатываемые методы оценки изменчивости состояния грунтов на основе СВЧ радиометрических данных могут быть использованы, в условиях малого числа тестовых полигонов, для которых доступны опорные данные контактных измерений.

Решение обозначенных проблем, предложенное в настоящем исследовании, обеспечивает совершенствование методологии спутникового СВЧ мониторинга природных сред Арктического региона, что, в свою очередь, позволяет продвинуться в реализации Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации.

Цель и задачи исследования

Целью работы является развитие методологии спутникового СВЧ мониторинга природных сред для обеспечения оперативной оценки и прогнозирования изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным, применимый для мониторинга в периоды стабильно мерзлого состояния грунтов и периоды интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги;
2. Провести обоснование выбора спутниковых СВЧ радиометрических средств мониторинга, по своим характеристикам оптимальных для получения данных о состоянии грунтов в Арктике;
3. Разработать теоретическую модель собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера», адекватно описывающую ее излучательные свойства для территорий Арктики;
4. Создать на основе разработанной модели программно-алгоритмическое обеспечение для количественной оценки изменчивости состояния грунтов Арктики;

5. Разработать методики обработки СВЧ радиометрических данных с использованием разработанного программно-алгоритмического обеспечения;
6. Определить границы географической области, в которой разработанный метод может быть использован для мониторинга грунтов без дополнительных мероприятий по валидации;
7. С помощью разработанного метода выполнить исследование изменчивости состояния грунтов в одном из ключевых для мониторинга мерзлых грунтов районов Арктики – на севере Западной Сибири.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются методы неразрушающего контроля природных сред, а предметом исследования – методы оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным.

Методы исследования

В работе использованы методы математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, линейной алгебры и аналитической геометрии, геометрической оптики и теории распространения радиоволн, теории распознавания образов.

Научная новизна работы

1. В отличие от существующих методов оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным, разработанный метод позволяет восстанавливать значения термодинамической температуры грунтов с учетом зависимости диэлектрических свойств многослойной среды «грунт-снег-атмосфера» от предыдущих ее состояний.
2. Теоретическая модель собственного СВЧ излучения многослойной среды разработана с использованием нового векторно-координатного подхода к учету особенностей макрорельефа земной поверхности.
3. Впервые создана и использована для целей мониторинга мерзлых грунтов Арктики методика идентификации ландшафтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным, позволяющая добиться точности идентификации 90% на основе набора из четырех информативных признаков – параметров временной изменчивости СВЧ излучения.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены в практику оперативного мониторинга природных сред, осуществляемого в настоящее время территориальными управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ, а также рядом академических и отраслевых организаций и институтов, выполняющих исследования в области экологии, климатологии, геофизиологии и развития энергетического потенциала (Институт географии РАН, Институт проблем Севера КНЦ РАН, Институт мерзлотоведения СО РАН, Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН и др.).

Полученные результаты СВЧ идентификации ландшафтов могут быть положены в основу новых моделей радиоизлучения системы «Земля-атмосфера», а также способны дополнить существующие модельные решения (в частности, модель глобального радиоизлучения Земли ИРЭ РАН). Сформулированные по результатам анализа СВЧ данных рекомендации по выбору районов, пригодных для внешней калибровки СВЧ радиометрического оборудования, предназначены для организаций-операторов спутниковой съемки (ФГБУ «НИЦ «Планета» и др.).

Разработанный метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным обеспечивает повышение точности определения значений температуры поверхностного слоя грунтов по СВЧ радиометрическим данным на 15-30% по отношению к существующим методам на основе регрессионных моделей и позволяет расширить применимость спутниковой СВЧ радиометрии для решения задач мониторинга грунтов Арктики.

Направление диссертационного исследования тесно связано с критическими технологиями РФ (технологиями мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения, технологиями предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера), утвержденными Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899.

Отдельные результаты исследования использованы в ходе выполнения работ по Государственному контракту №14.578.21.0090 («Разработка научно-технических решений и методов создания аппаратно-программного комплекса для дистанционного мониторинга и экологического контроля состояния объектов добычи и переработки нефти и газа на основе технологий фотоники»).

Положения, выносимые на защиту

1. Метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по спутниковым СВЧ радиометрическим данным.
2. Теоретическая модель собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера», описывающая излучательные свойства с учетом макрорельефа поверхности суши.
3. Программно-алгоритмическое и методическое обеспечение для мониторинга мерзлых грунтов спутниковым СВЧ радиометрическим методом.
4. Методика автоматизированной идентификации ландшафтов по многолетним рядам спутниковых СВЧ радиометрических данных.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на следующих симпозиумах и конференциях: 3rd International SPACE World Conference (Германия, Франкфурт-на-Майне, 2012 г.), Lahti Symposium «Seasonal Snow and Ice» (Финляндия, Лахти, 2012), на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург, 2011 г.), XV Гляциологическом симпозиуме «Современная изменчивость криосферы

Земли» (Архангельск, 2012 г.), XXVII Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2011 г.), V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред» (Муром, 2012 г.), II и III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2012, 2014 гг.), X Всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» (Москва, 2012 г.), V Всероссийской конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве» (Москва, 2013 г.), Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (Иркутск, 2014 г.), XIV Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика (РИ-2014)» (Санкт-Петербург, 2014 г.), на заседаниях ежегодной Научной сессии ГУАП (Санкт-Петербург, 2012, 2013 гг.), а также на летней школе Nansen-NVP summer school «Shipping in Arctic Water: The interaction of sea ice, ship technology, climate change, economy and other operational conditions» (Шпицберген, 2013 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них две статьи – в изданиях из списка, рекомендованного ВАК РФ, две работы в изданиях из списка ВАК находятся в печати; еще одна работа принята к публикации. Список публикаций приводится на стр. 21.

Личный вклад автора

Автором лично выполнены все этапы диссертационного исследования: постановка задач, создание теоретических модельных описаний, методического, алгоритмического и программного обеспечения, проведение модельных экспериментов, обработка и интерпретация данных, формулировка выводов. Исследование развивает концепцию «СВЧ климатологии», предложенную профессором В.В.Мелентьевым.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения. Общий объем – 163 с., в том числе 57 рисунков и 28 таблиц. Список литературы включает 136 наименований, из них 68 на русском языке.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационного исследования, определен объект и предмет исследования, выполнена постановка цели и задач, освещены вопросы научной новизны и практической значимости полученных результатов.

Первый раздел имеет обзорный характер и посвящен анализу литературных источников для формализации требований к методу оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов, а также для выбора инструментального обеспечения мониторинга.

Возможность дистанционной СВЧ диагностики параметров состояния системы «Земля-атмосфера» была теоретически обоснована в начале 1960-х гг. в работах профессора Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А.И. Воейкова К.С. Шифрина, а заданное в них направление исследований получило развитие в трудах его учеников и последователей. Практическое использование метода спутниковой СВЧ радиометрии для изучения природных сред в Арктике было начато в 1970-х гг. с запуском советских искусственных спутников Земли (ИСЗ) «Космос-243», «Космос-384», оснащенных многоканальными СВЧ радиометрами.

Значительный вклад в развитие методологии исследований грунтов при отрицательных температурах с применением СВЧ радиометрических методов внесли работы П.П. Боброва, П.В. Жирова, С.В. Кривальцевича, А.С. Яценко; В.В. Мелентьева, Л.П. Бобылева, О.М. Johannessen; С.А. Комарова, В.Л. Миронова; К.В. Музалевского, А.А. Швалева; А.Т.С. Chang, M.S.Cao; В.В. Zuerndorfer, A.W. England, M.C. Dobson, F.T. Ulaby; T. Zhang, R.L. Armstrong; Y. Kim, J.S. Kimball, K.C. McDonald, J. Glassy; M. Fily, A. Royer, K. Goita, C. Prigent; L.A. Jones, J.S. Kimball, K.C. McDonald; M. Langer, S. Westermann, M. Heikenfeld; S. Marchenko, S. Hachem, V. Romanovsky, C. Duguay.

Описанный в разделе опыт исследований показывает, что при существенном улучшении характеристик спутниковой аппаратуры в последние десятилетия прорывных успехов в создании высокоточных методов восстановления значений параметров грунтов (термодинамической температуры, влажности, засоленности) и оценки их изменчивости по СВЧ радиометрическим данным не наблюдается. В современных системах мониторинга СМП и ММП (сетях WMO, CALM, GTN-P) спутниковая СВЧ аппаратура практически не применяется для получения информации о состоянии грунтов. Использование спутниковых данных наряду с данными контактных измерений предусмотрено только в экспериментальной системе DUE Permafrost, однако диагностические возможности СВЧ радиометрии реализованы в ней далеко не полностью.

Интегральной величиной, выражающей интенсивность собственного СВЧ излучения исследуемого объекта и несущей информацию о его состоянии, является радиояркостная температура (РЯТ). В случае СВЧ диапазона РЯТ среды представляется произведением ее коэффициента излучения Σ на частоте f и усредненной термодинамической температуры T_{md} . Согласно результатам комплексных натурных исследований природных сред, проводившихся в России и за рубежом, РЯТ участков суши находится в сложной зависимости от физических, физико-химических, гранулометрических свойств грунтов, характеристик сопряженных природных сред (растительности, снежного покрова) и границ раздела между ними. В совокупности с существенной пространственной неоднородностью грунтов в Арктике это значительно усложняет задачу их мониторинга с применением спутникового СВЧ радиометрического метода.

Анализ свойств мерзлых грунтов Арктики как объекта мониторинга, проведенный на базе литературных источников, позволил формализовать

требования к методу оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии. Основным требованием и необходимым условием эффективного восстановления значений параметров грунтов и последующей оценки их изменчивости является использование частоты в диапазоне 6-8 ГГц, позволяющей обеспечить максимальную толщину скин-слоя среды и минимизировать экранирующее влияние снежного и растительного покрова без существенного ухудшения пространственного разрешения. Согласно этому условию был выполнен выбор аппаратуры для получения оперативных СВЧ данных. В качестве такого средства из ряда многоканальных СВЧ радиометров, находящихся на орбите (табл. 1), был выбран функционирующий с 2012 г. СВЧ радиометр AMSR-2 (ИСЗ JCOM-W), имеющий широкий набор частотных каналов, в том числе наиболее соответствующий условию канал 6,9 ГГц. Архивные данные за 2002-2011 гг. для тех же частот были получены с помощью СВЧ радиометра AMSR-E (ИСЗ Aqua).

Таблица 1 – Характеристики многоканальных спутниковых СВЧ радиометров

ИСЗ	DMSP F-16 – F-19	JCOM-W	Aqua	Метеор-М №1, №2
Страна	США	Япония	США	Россия
Год запуска	2003 – 2014	2012	2002	2009, 2014
СВЧ радиометр	SSMIS	AMSR-2	AMSR-E	МТВ3А
Диапазон частот, ГГц	19,4÷183,3	6,9÷89	6,9÷89	10,7÷183,3
Ширина полосы обзора, км	1707	1450	1445	1500
Пространственное разрешение, км	13x14 (183,3 ГГц) – 42x70(19,4 ГГц)	3x5 (89 ГГц) – 35x62 (6,9 ГГц)	4x6 (89 ГГц) – 43x74 (6,9 ГГц)	9x21 (183,3 ГГц) – 89x198 (10,7 ГГц)

Во втором разделе на основе комплексного анализа данных многолетних спутниковых и контактных измерений в ряде ключевых районов российской Арктики разработан метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным.

Ключевыми районами для контроля состояния мерзлых грунтов в российском секторе Арктики в соответствии с работами В.В. Мелентьева, Ю.А. Израэля выбраны северо-восток Европейской территории России (ЕТР), север Западной Сибири (ЗС), где грунты наиболее чувствительны к изменениям климата, и северо-восток Восточной Сибири (ВС) с наименьшей чувствительностью грунтов к климатическим изменениям. Для комплексного анализа данных и валидации создаваемого программно-алгоритмического обеспечения в пределах каждого ключевого района было выбрано по одному тестовому участку вблизи немногочисленных действующих ГКС: У1 на п-ове Ямал около ГКС Марре-Сале в ЗС, У2 около ГКС Аяч-Яга на ЕТР, У3 рядом с ГКС г. Родинка в ВС. Данные контактных измерений с ГКС и ГМС, задействованные в анализе, включают в себя отсчеты термодинамической температуры поверхностного слоя грунтов T_{cp} и их объемной влажности W

(содержания жидкой влаги), температуры воздуха $T_{возд}$, толщины снежного покрова H , информацию о погодных явлениях. Используемая спутниковая информация представлена находящимися в открытом доступе многоканальными данными с СВЧ радиометра AMSR-E в виде мозаик РЯТ в азимутальной проекции Ламберта с пространственным разрешением 25 км. Всего в ходе исследования было обработано более 13000 таких мозаик.

Анализ ежедневных данных спутниковых и контактных измерений за 2005-2008 гг., сведенных в локальный архив, показал, что для тестовых участков в годовом цикле визуально и по статистическим параметрам временных рядов РЯТ выделяются четыре периода, не совпадающие с традиционными сезонами. Эти периоды отличаются своеобразием изменчивости РЯТ, которое характеризует состояние грунтов: А – период стабильно мерзлого состояния грунтов и снежного покрова; В – период циклического повторения процессов оттаивания–замерзания; С – летний, или вегетационный, период; D – осенний период промерзания грунтовых слоёв.

Для мерзлых грунтов $T_{гр}$ является основным параметром их состояния, т.к. W меняется в связи с изменениями $T_{гр}$ в соответствии с характерной для конкретного типа грунтов температурно-влажностной зависимостью. Исходя из этого разработанный метод ориентирован на выполнение оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов на базе показателей, значения которых рассчитываются непосредственно по значениям $T_{гр}$, и показателей, косвенно связанных с $T_{гр}$. В диссертации эти показатели названы индикаторами изменчивости состояния мерзлых грунтов, поскольку их изменчивость во времени позволяет судить о наличии изменений в состоянии мерзлых грунтов.

Изменчивость состояния мерзлых грунтов в межгодовом масштабе оценивается на основе трех индикаторов, значения которых восстанавливаются по СВЧ данным:

- 1) $T_{гр}$, усредненной за полные календарные месяцы года со стабильно мерзлым состоянием грунтов – январь и февраль ($I1г$);
- 2) продолжительности периода стабильно мерзлого состояния грунтов А ($I2г$);
- 3) продолжительности периода интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги В ($I3г$).

Поиск решения обратной задачи восстановления значений $T_{гр}$ по данным спутниковой СВЧ радиометрии требует использования модели, определенным образом описывающей связь между РЯТ и $T_{гр}$, а также другими параметрами. В ходе анализа было установлено, что линейные регрессионные модели хорошо описывают связь между РЯТ и $T_{гр}$ в периоды А и С, когда коэффициент излучения Σ многослойной среды остается практически постоянным (в случае А за счет минимальных колебаний количества незамерзшей влаги в грунте, в случае С – из-за стабильно высоких значений Σ растительного покрова). В то же время, эта связь с трудом описывается такими моделями в периоды В и D, когда происходят резкие синхронные колебания как Σ , так и $T_{мд}$ системы. Вкупе с ограниченным числом тестовых полигонов в Арктике, для которых доступны данные контактных измерений, это обусловило использование для

описания связи между РЯТ и параметрами состояния грунтов (T_{cp} и W) модели собственного СВЧ излучения многослойной среды.

Для повышения точности восстановления значений T_{cp} в настоящей работе предложено учитывать влияние макрорельефа поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства, а также зависимость диэлектрических свойств излучающей среды от предыдущих ее состояний.

Усовершенствованная модель собственного СВЧ излучения многослойной среды с грунтом в качестве нижнего слоя разработана на базе модели ГГО им. А.И. Воейкова. Использована классическая трехслойная схема «грунт(3)-снег(2)-атмосфера(1)». В этом случае РЯТ ($T_{я}$), фиксируемая с борта ИСЗ, при условии вертикальной однородности слоев и параллельности границ между ними с учетом радиопрозрачности атмосферы на частотах ниже 7 ГГц может быть описана следующим выражением:

$$T_{я} = (1 - r_{21}) \left[(1 + r_{23} e^{-\alpha_2 l_2}) \cdot T_2 (1 - e^{-\alpha_2 l_2}) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (r_{21}^n r_{23}^n e^{-2n\alpha_2 l_2}) + \right. \\ \left. + (1 - r_{23}) \cdot T_3 \cdot e^{-\alpha_2 l_2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (r_{21}^n r_{23}^n e^{-2n\alpha_2 l_2}) \right],$$

где r_{ij} – коэффициенты отражения Френеля для границы между слоями i и j , рассчитываемые на основе данных о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) слоев, T_2 и T_3 – усредненные термодинамические температуры соответственно слоев 2 и 3, α_2 – удельное поглощение в слое 2 при угле визирования, отличном от нуля, l_2 – толщина снежного покрова. Зависимость КДП грунта от W описана с помощью модифицированной рефракционной модели, учитывающей наличие в грунте связанной влаги (согласно П.П. Боброву, В.Л. Миронову). Зависимости W от T_{cp} для четырех типов грунтов восстановлены в ходе дополнительных расчетов по результатам экспериментальных исследований Н.А. Цытовича, З.А. Нерсесовой.

Для усовершенствования модельного описания в части учета влияния макрорельефа поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства был разработан векторно-координатный подход к определению геометрии визирования, в отличие от традиционного векторно-углового подхода одинаково применимый для случаев авиационной и спутниковой СВЧ съемки. С помощью математического аппарата линейной алгебры получены формулы для вычисления эффективных (локальных) углов визирования $\theta_{эфф}$ и углов поворота плоскостей поляризации ξ для элементарных площадок в пределах мгновенной области обзора СВЧ радиометра по данным об их уклонах и экспозиции, извлекаемым из цифровой модели рельефа (ЦМР):

$$\theta_{эфф} = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{|(-\sin \mu \sin \gamma)m + (\sin \mu \cos \gamma)n + (-\cos \mu)p|}{\sqrt{(-\sin \mu \sin \gamma)^2 + (\sin \mu \cos \gamma)^2 + (-\cos \mu)^2} \cdot \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}\right), \\ \xi = \pm \arccos\left(\frac{|(m^2 + n^2) \cos \mu|}{\sqrt{m^2 + n^2} \sqrt{(m^2 + n^2) \cos^2 \mu + (m \cos \gamma + n \sin \gamma)^2 \sin^2 \mu}}\right),$$

где $\pm\gamma$ – экспозиция склона, выраженная в градусах, $\pm\mu$ – уклон элементарной площадки по отношению к условной горизонтальной плоскости, m , n и p – коэффициенты канонического уравнения прямой, которой принадлежит визирующий луч.

Учет влияния макрорельефа земной поверхности на ее СВЧ излучательные свойства осуществляется путем коррекции коэффициентов Френеля и удельного поглощения в слоях среды по получаемым значениям $\theta_{эфф}$ и ζ .

В третьем разделе разработано программно-алгоритмическое и методическое обеспечение для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов, а также выполнена его валидация.

Алгоритм оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по СВЧ радиометрическим данным состоит из четырех основных блоков: блока ввода-вывода и предварительной обработки входных данных (Б1), блока распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов (Б2), блока восстановления значений $T_{зр}$ (Б3), блока расчета значений индикаторов изменчивости состояния грунтов и оценки их динамики (Б4).

В блоке Б2 для распознавания границ между периодами А и В, С и D используется разность РЯТ в каналах 36,5 ГГц и 6,9 ГГц на V-поляризации, а для выявления границы C|D – первая производная от стандартного отклонения в 30-дневных выборках РЯТ на $f = 6,9$ ГГц и H-поляризации (рис. 1). Такой выбор информативных признаков обоснован в ходе сравнительных испытаний на тестовых участках У1-У3 для 2005-2008 гг. двух альтернативных подходов к распознаванию границ (по данным одноканальных и двухканальных СВЧ радиометрических измерений). Эффективность автоматизированного распознавания оценена путем сравнения его результатов с опорными данными: данными контактных измерений с ГКС и ГМС, подкрепленными результатами визуального дешифрирования СВЧ данных и снимков со спектрорадиометра MODIS, размещенного на борту ИСЗ Aqua и ведущего съемку в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах электромагнитного спектра.

Блок Б3 предназначен для решения обратной задачи восстановления $T_{зр}$ на основе теоретического модельного описания собственного СВЧ излучения многослойной среды. Для учета изменчивости КДП слоев среды предусмотрено использование ретроспективных данных о предыдущих ее состояниях, что является отличительной чертой разработанного метода и алгоритма оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов. В основу расчета КДП снежного покрова положена процедура деления календарного года на периоды А-D. КДП снега задается как кусочная функция числа предшествующих суток с мерзлым и талым состоянием грунта и их принадлежности к периоду А или В (рис. 2), что позволяет учесть различие физических и, как следствие, диэлектрических свойств снежного покрова в мерзлом/талом состоянии до и после первых оттепелей. Талый / мерзлый статус грунта в конкретные даты периода В проверяется путем расчета разности между РЯТ в каналах 36,5 и 6,9 ГГц (этот способ выявления процессов оттаивания грунтов был предложен ранее в работах N.V. Smith, S.S. Saatchi, J.T. Randerson, T. Zhang, R.L. Armstrong).

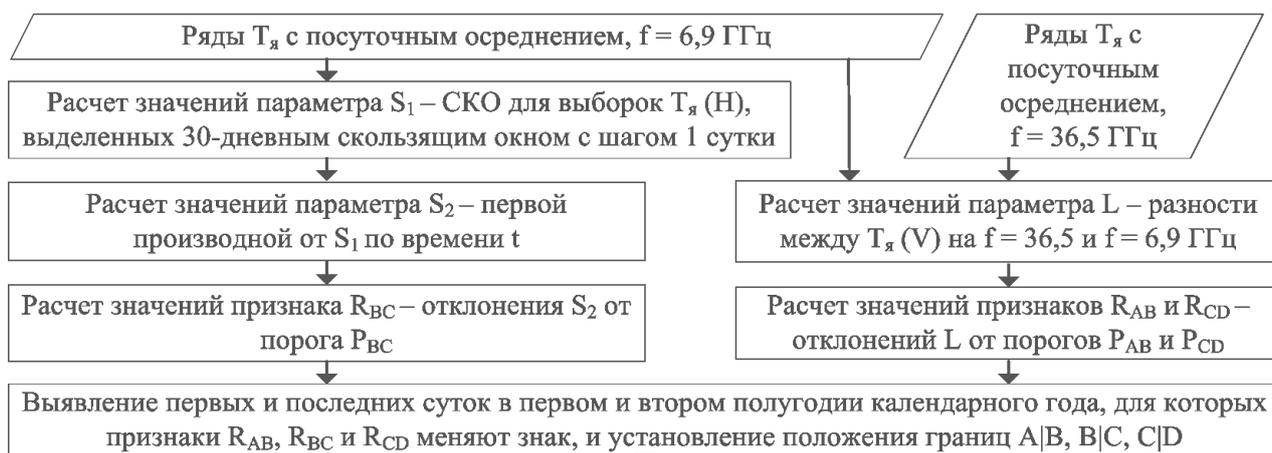


Рисунок 1 – Схема алгоритмического блока распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов Арктики

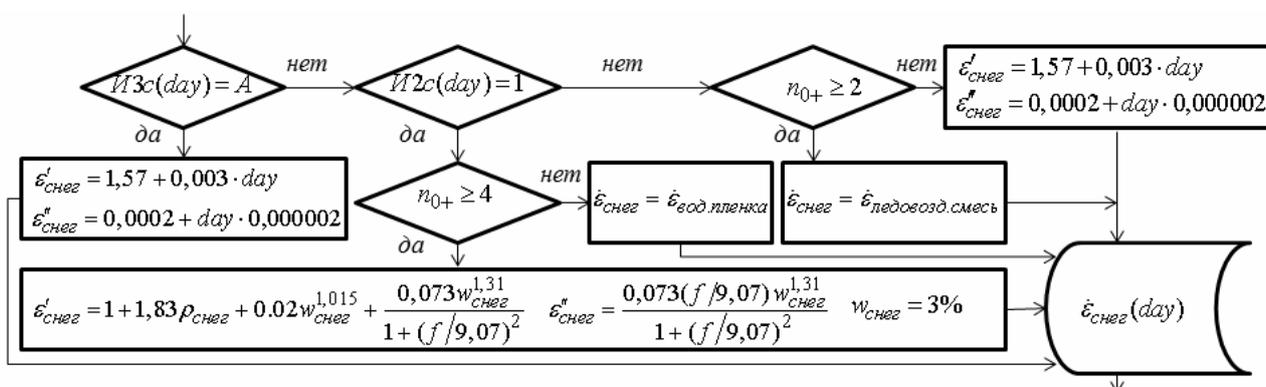


Рисунок 2 – Фрагмент схемы алгоритмического блока восстановления значений $T_{гр}$, отвечающий за определение ежедневных значений КДП снега $\dot{\epsilon}_{\text{снег}}(\text{day})$; $ИЗс$ – индикатор мерзлого / талого состояния грунта и снега, $ИЗс$ – индикатор принадлежности суток к периодам годового цикла А-D, n_{0+} – число оттепелей перед сутками day , $\rho_{\text{снега}}$ – плотность снега, w – влажность снега, $\dot{\epsilon}_{\text{вод.пленка}}$ – КДП пленки воды, $\dot{\epsilon}_{\text{ледовозд.смесь}}$ – КДП ледовоздушной смеси

Решение обратной задачи восстановления среднесуточных значений $T_{гр}$ по спутниковым 6,9 ГГц СВЧ радиометрическим данным на основе предложенного модельного описания сводится к поиску минимума невязки Q между модельными и измеренными с ИСЗ РЯТ:

$$Q = \sqrt{(T_{я(\text{измер.})}^V - T_{я(\text{мод.})}^V(T_{гр}, W))^2 + (T_{я(\text{измер.})}^H - T_{я(\text{мод.})}^H(T_{гр}, W))^2},$$

где W – объемная влажность грунта, %, $T_{я(\text{измер.})}$ – измеренные с ИСЗ $T_{я}$, $T_{я(\text{мод.})}$ – модельные $T_{я}$, рассчитываемые в соответствии с теоретическим описанием модели собственного СВЧ излучения многослойной среды. Поиск минимума Q для конкретных суток выполняется в координатах $T_{гр} - W_{\text{max}}$ с регулярным шагом 0,5 К по $T_{гр}$ и 5 % по W_{max} , где W_{max} – максимальная объемная влажность грунта, равная его влажности в талом состоянии при отсутствии обмена влагой с другими слоями многослойной среды.

На основе восстановленных среднесуточных значений $T_{гр}$ и положения границ периодов А-D рассчитываются значения индикаторов изменчивости

состояния грунтов, оценивается их вариабельность, определяются трендовые составляющие межгодовой изменчивости индикаторов.

Реализация разработанного алгоритма в виде программного продукта выполнена на языке программирования М (MatLab). Приложение имеет оконный интерфейс и предусматривает графический вывод результатов расчетов с их записью во внешние файлы.

Созданное методическое обеспечение для оценки изменчивости состояния грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным включает в себя методику предварительного анализа данных СВЧ радиометрии с использованием картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ и методику автоматизированной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов с помощью разработанного программно-алгоритмического обеспечения. По картосхемам в координатах «время-географическая широта» визуальным способом производится выявление особенностей изменчивости РЯТ, которые могут служить основой для первичных выводов о состоянии грунтов. Как было обнаружено в ходе сравнительного анализа картосхем, максимальной информативностью обладают картосхемы, построенные для меридиональных трансектов и отражающие внутригодовую изменчивость РЯТ на $f = 6,9$ ГГц и Н-поляризации (рис. 3).

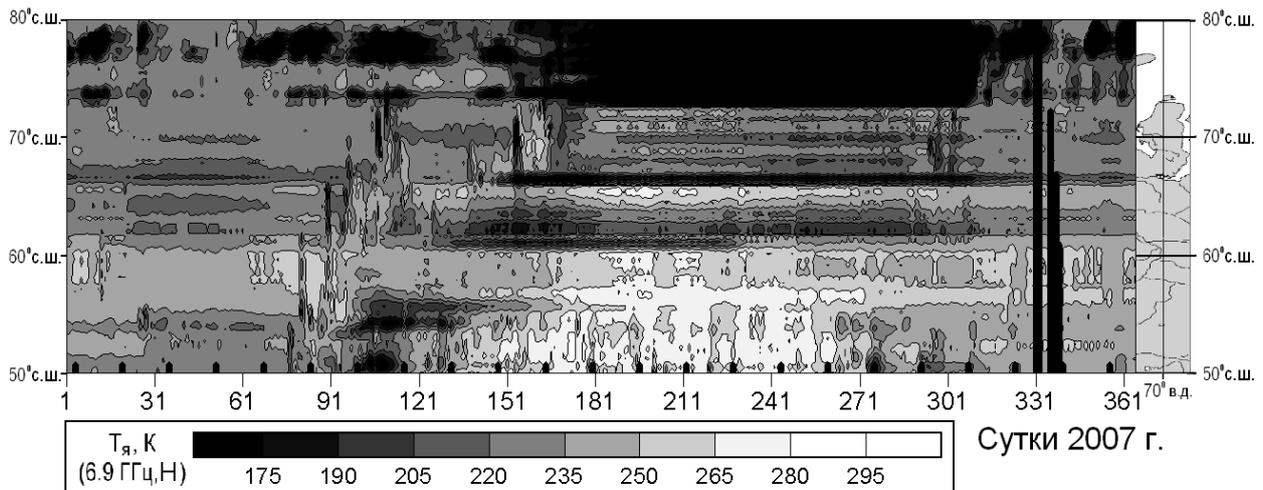


Рисунок 3 – Пример картосхемы пространственно-временной изменчивости РЯТ, построенной для трансекта 70° в.д. по данным 365 мозаик распределения РЯТ в пределах полушария за 2007 г. (AMSR-E)

Для валидации программно-алгоритмического обеспечения были привлечены данные контактных измерений с ГМС и ГКС, спутниковые снимки видимого и ИК диапазона со спектрорадиометра MODIS, картографические материалы на различных носителях (ландшафтные, почвенные, геокриологические, фитогеографические карты, ЦМР). Валидация выполнена на тестовых участках У1, У2, У3 для периодов годового цикла А и В 2005-2008 гг.

Характер внутригодовой изменчивости T_{gr} , восстановленный с помощью разработанного программно-алгоритмического обеспечения, хорошо

согласуется с опорными данными контактных измерений (рис. 4). Полученные в результате значения среднеквадратичной ошибки восстановления T_{cp} (СКОш) и коэффициента детерминации R^2 (табл. 2) показывают преимущество алгоритма в точности перед алгоритмами на базе регрессионных моделей и его конкурентоспособность по отношению к альтернативным решениям на основе моделей собственного СВЧ излучения, предложенным в современных работах Jones et. al. (2007), Музалевского и др. (2013). Дополнительные расчеты показали, что исключение из разработанного алгоритма процедур вычисления значений КДП снега как функции предыдущих состояний многослойной среды ведет к увеличению СКОш для полной выборки с трех тестовых участков за 2005-2008 гг. с 2,7 К до 3,5 К, т.е. почти на 30%, что подтверждает ценность предложенного решения. Также установлено, что для УЗ как для участка с наибольшими перепадами высот учет макрорельефа оказывает существенное влияние на разницу между восстановленными и измеренными значениями T_{cp} в период А. Разработанный векторно-координатный подход к определению геометрии визирования позволяет адекватно описать зависимость углов визирования и углов поворота плоскостей поляризации от уклона и экспозиции участков поверхности суши.

Эффективность автоматизированного распознавания границ периодов А-Д с помощью разработанного алгоритма колеблется в пределах 83-100% в зависимости от участка и временной границы. Наименьшая эффективность получена для участка УЗ и границы С|D.

Таблица 2 – Значения среднеквадратичной ошибки восстановления значений T_{cp} (СКОш) и коэффициента детерминации R^2 в периоды годового цикла А и В 2005-2008 гг., усредненные по тестовым участкам У1-У3, при использовании алгоритма оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов на основе разработанной модели собственного СВЧ излучения многослойной среды и альтернативных регрессионных моделей

Модель, положенная в основу алгоритма оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов	СКОш, К		R^2	
	для периода		для периода	
	А	В	А	В
Модель собственного СВЧ излучения многослойной среды	2,72	2,78	0,67	0,54
Модель парной регрессии $T_{cp} = a \cdot T_{я}^{6,9V} + b$	4,45	3,2	0,10	0,31
Модель парной регрессии $T_{cp} = a \cdot T_{я}^{36,5V} + b$	4,61	3,3	0,03	0,27
Модель множественной регрессии $T_{cp} = a \cdot T_{я}^{6,9V} + b \cdot T_{я}^{36,5V} + c$	4,41	3,1	0,11	0,35
Модель множественной регрессии $T_{cp} = a \cdot T_{я}^{6,9V} + b \cdot T_{я}^{36,5V} + c \cdot T_{я}^{6,9H} + d \cdot T_{я}^{36,5H} + e$	4,0	3,1	0,27	0,37

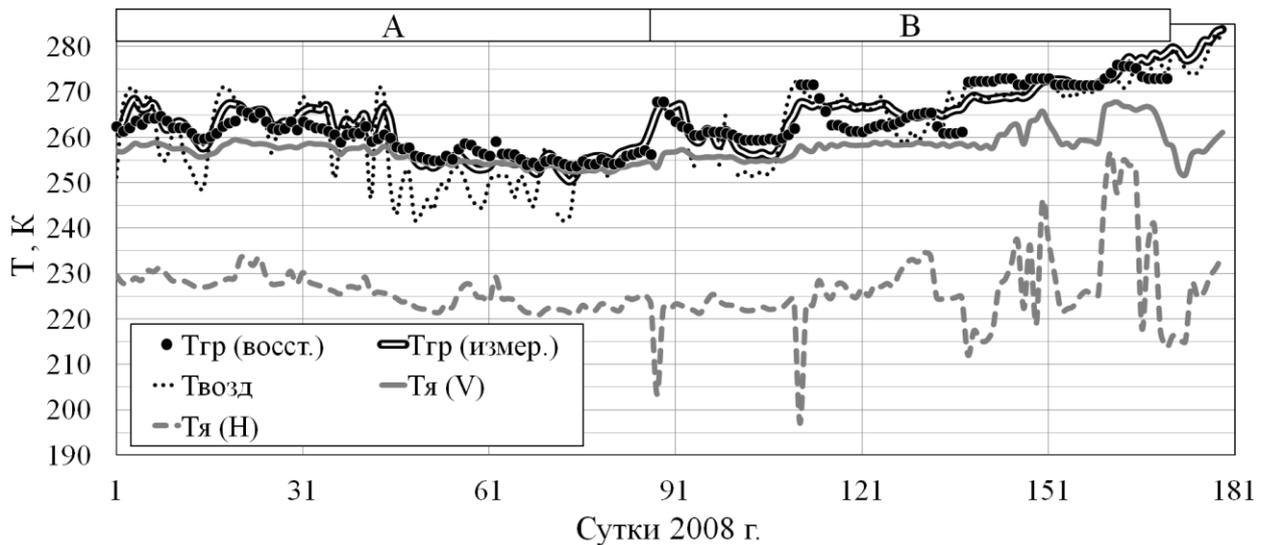


Рисунок 4 – Результаты восстановления $T_{гр}$ по данным AMSR-E для тестового участка У1 в периоды А и В 2008 г. в сопоставлении с результатами измерений $T_{гр}$ и $T_{возд}$ на площадках ГКС и ГМС Марре-Сале и зафиксированными с ИСЗ РЯТ участка ($f = 6,9$ ГГц, V- и H-поляризация)

Четвертый раздел посвящен определению границ географической области, в которой разработанный метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов может использоваться для мониторинга без дополнительных мероприятий по валидации, и апробации метода на п-ове Ямал. В условиях малого количества тестовых полигонов, на которых ведутся наземные инструментальные наблюдения за состоянием грунтов, первая задача решена путем разработки и использования методики автоматизированной идентификации ландшафтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным.

Выбор алгоритма классификации для сопоставления участкам суши типов ландшафтов, а также информативных признаков – параметров временной изменчивости СВЧ излучения на $f = 6,9$ ГГц и $f = 36,5$ ГГц, на основании значений которых производится идентификация этих типов, выполнен по результатам тестовых испытаний для трансектов Т1 и Т2, пересекающих территорию Сибири и акватории морей Северного Ледовитого океана от 50° с.ш. до 80° с.ш. по меридианам 70° в.д. и 130° в.д. соответственно. Испытан алгоритм последовательной пороговой классификации №1 (статичное «дерево решений») и алгоритм классификации по методу наименьшего евклидова расстояния №2. 14 информативных признаков были выделены в ходе анализа временных рядов РЯТ эталонных участков размера 25×25 км, каждый из которых представляет один из 9 генеральных типов ландшафтов ЗС и ВС.

Эффективность решения задачи идентификации при разных сочетаниях «алгоритм + набор признаков» оценивалась путем сравнения результатов с картой традиционного ландшафтного районирования из атласа СССР, картой земных покровов Бостонского университета, созданной по данным MODIS, и картой наземных экосистем Евразии TerraNorte, созданной по данным SPOT4-VEGETATION в ИКИ РАН.

Наибольшую эффективность показало сочетание алгоритма №2 и набора из четырех признаков, характеризующих изменчивость РЯТ на $f = 6,9$ ГГц. К ним относятся среднегодовые многолетние значения РЯТ на V-поляризации, средние январские многолетние значения РЯТ на V-поляризации, стандартное отклонение в рядах значений РЯТ с марта по июнь на H-поляризации, усредненные за периоды март-июнь многолетние значения РЯТ на H-поляризации. При этом сочетании, положенном в основу разработанной методики, достигнута минимальная суммарная ошибка идентификации – 10% для трансекта T1 относительно карты TerraNorte.

Апробация методики показала, что в евразийском секторе Арктики по данным AMSR-E распознаются три генеральных типа ландшафтов: тундра, тундролесье и водно-болотные комплексы. Разработанный метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов рекомендуется использовать без дополнительных мероприятий по валидации на участках, классифицированных как тундровые. Это связано с особенностями динамики РЯТ на участках с ландшафтами двух других типов, способными привести к ошибкам в оценке изменчивости состояния грунтов. Данные особенности вызваны в случае водно-болотных комплексов наличием открытой воды, в случае тундролесья – более выраженным вкладом растительности в формирование СВЧ излучения многослойной средой на частотах 6,9 ГГц и выше по сравнению с тундрой.

Апробация разработанного метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов выполнена на материале многолетних архивных данных с СВЧ радиометра AMSR-E за период 2003-2010 гг. Исследована изменчивость состояния мерзлых грунтов п-ова Ямал.

Предварительный анализ радиоярких контрастов по картам пространственно-временной изменчивости РЯТ позволил сделать первичные выводы о состоянии грунтов в отдельных пространственно-временных областях и определить источники возможных ошибок при использовании разработанного программно-алгоритмического обеспечения. Выявленная по картам круглогодичная стабильность Σ лесного полога хвойных вечнозеленых лесов южнее 61° с.ш. вдоль трансекта T1 позволила рекомендовать территории этой ландшафтной зоны в качестве абсолютно черного тела для внешней калибровки СВЧ радиометров.

С помощью разработанного метода для территории п-ова Ямал были получены интегральные оценки пространственной и временной изменчивости состояния грунтов на региональном уровне. Построенные карты пространственного распределения T_{zp} отражают сложную динамичную структуру пространственной изменчивости данного параметра (рис. 5). Между годами, контрастными по суровости зимних сезонов, наблюдается различие как в характере временной изменчивости T_{zp} , так и в положении границ между периодами А-Д (рис. 6). На основе среднесуточных восстановленных значений T_{zp} рассчитаны значения индикатора III_{Σ} (рис. 7). Наибольшая пространственная вариабельность III_{Σ} зафиксирована для 2008, 2006 и 2009 гг.

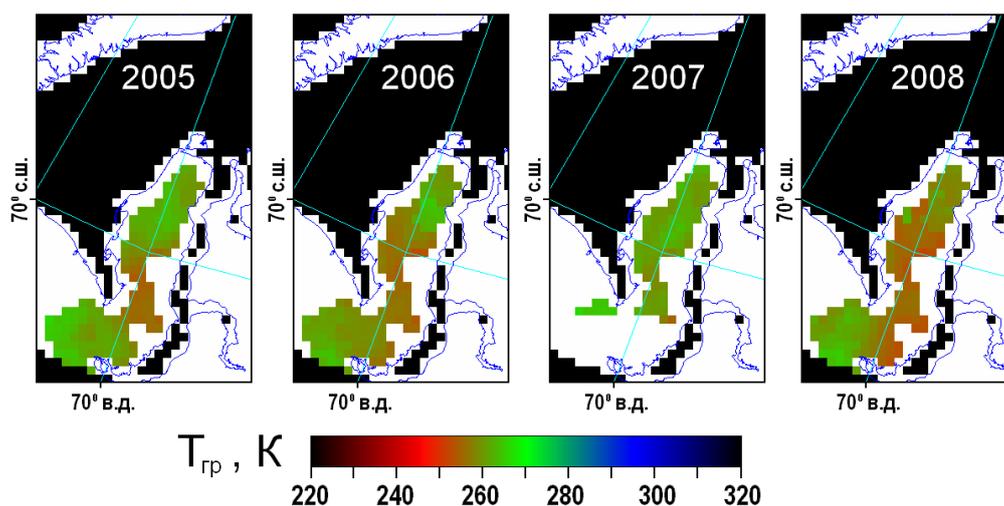


Рисунок 5 – Картосхемы пространственного распределения восстановленных по данным AMSR-E $T_{гр}$ на 11 марта 2005-2008 г. для территорий п-ова Ямал, относящихся к генеральному типу ландшафтов «тундра»

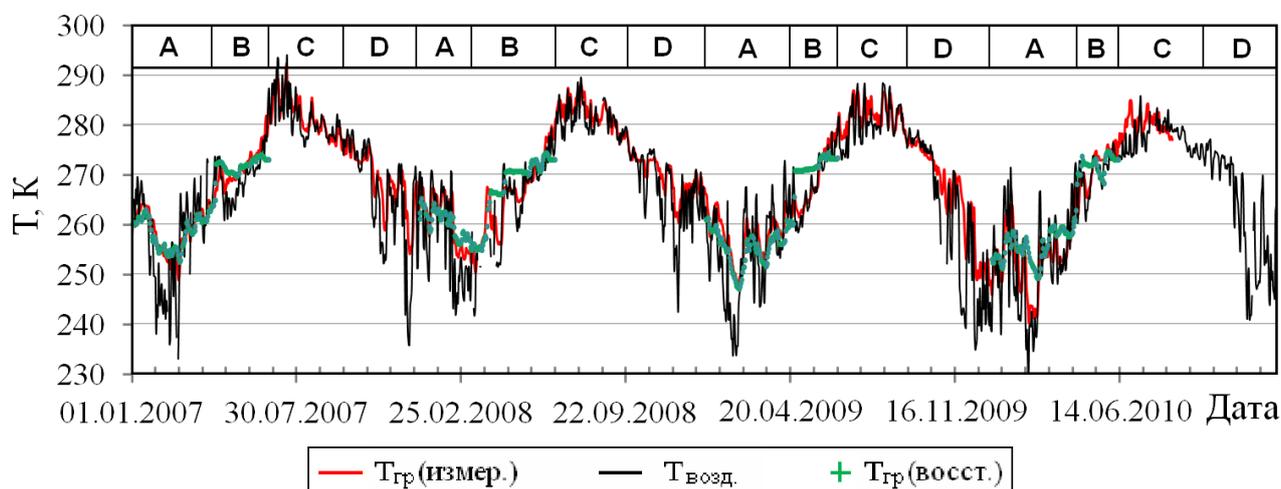


Рисунок 6 – Изменчивость усредненных по территории п-ова Ямал $T_{гр}$, восстановленных по данным AMSR-E, в 2007-2010 гг., в сопоставлении с данными измерений $T_{гр}$ и $T_{возд}$ с ГКС и ГМС Марре-Сале

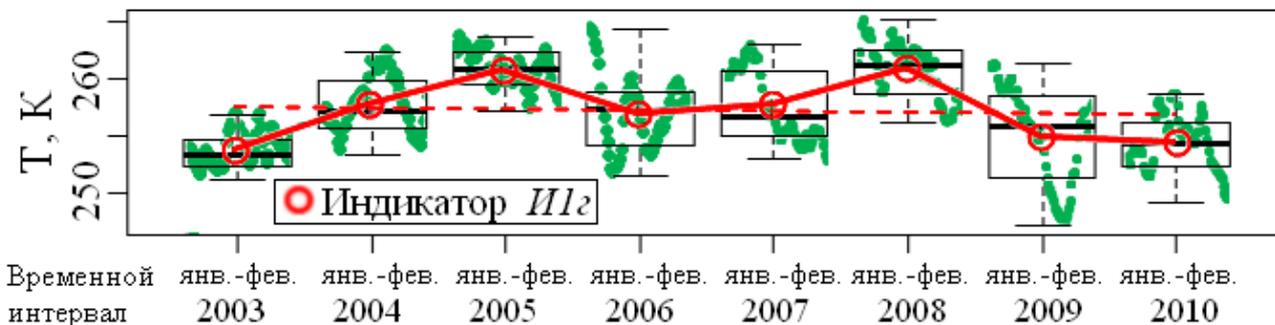


Рисунок 7 – Динамика усредненных по территории п-ова Ямал $T_{гр}$ для временных интервалов январь-февраль 2003-2010 гг. (результаты восстановления по данным AMSR-E); диаграммы размаха отражают медианное значение, кватили и размах для каждого временного интервала

При имеющейся длине рядов СВЧ радиометрических измерений на частоте 6,9 ГГц на исследуемом временном отрезке не выявлено значимых трендов изменения индикатора $I1g$ (коэффициенты детерминации линейной модели для 98% рассматриваемой территории не превышают 0,1). Сопоставление значений $I1g$ с соответствующими значениями T_{cp} и $T_{возд}$, рассчитанными по данным контактных измерений с ГКС и ГМС Марре-Сале, показало, что ход усредненных по территории п-ова Ямал значений $I1g$ на 8-летнем интервале хорошо согласуется с ходом $T_{возд}$, причем $I1g$ для всех лет оказывается больше по величине на 3-6 К. Расхождения между площадными оценками $I1g$ и усредненными за январь-февраль T_{cp} с ГКС достигают 1-3 К. Наблюдаемые значения $I1g$ находятся далеко за пределами температурных диапазонов интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги для всех основных типов грунтов, хотя отдельные среднесуточные отсчеты T_{cp} близки к нижним границам таких диапазонов для высокодисперсных грунтов.

На интервале 2003-2010 гг. выявлен слабо выраженный тренд к уменьшению значений индикатора $I2g$ и увеличению значений индикатора $I3g$ (рис. 8), что обусловлено смещением границы между периодами А и В в сторону более ранних дат на 4,8 сут./год при практически неизменном положении границы В|С. Для получения достоверных количественных оценок тенденций межгодовой изменчивости состояния мерзлых грунтов требуются более длинные ряды спутниковых СВЧ измерений на частоте 6,9 ГГц, а также на более низких частотах, что позволило бы увеличить толщину скин-слоя.

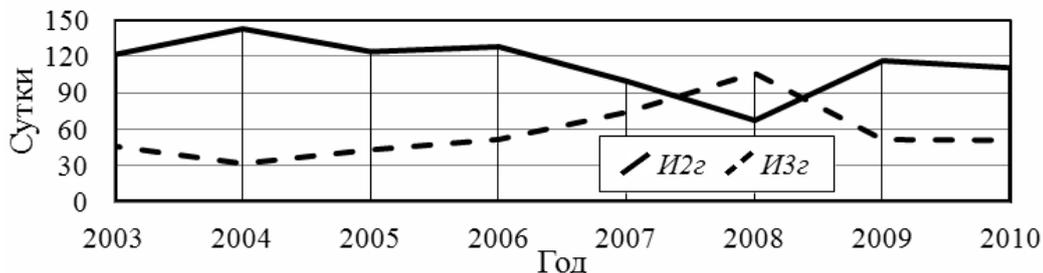


Рисунок 8 – Межгодовая изменчивость усредненных по территории п-ова Ямал значений индикаторов $I2g$ (продолжительности периода А) и $I3g$ (продолжительности периода В) в 2003-2010 гг. по данным AMSR-E

В заключении приводятся основные результаты диссертационного исследования, формулируются выводы.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным на основе трех индикаторов его динамики: температуры грунтов, усредненной за месяцы январь и февраль, продолжительности периодов календарного года со стабильно мерзлым состоянием грунтов и продолжительности периодов интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги.

2. Разработанный метод позволяет восстанавливать значения термодинамической температуры грунтов с учетом зависимости диэлектрических свойств слоев среды «грунт-снег-атмосфера» от предыдущих ее состояний, что обеспечивает повышение точности восстановления температуры грунтов в периоды стабильно мерзлого состояния грунтов и периоды интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги.
3. Предложен векторно-координатный подход к определению геометрии визирования при учете влияния макрорельефа поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства.
4. Разработана теоретическая модель собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера», в которой с помощью предложенного векторно-координатного подхода учитывается влияние макрорельефа поверхности суши.
5. Создано программно-алгоритмическое и методическое обеспечение для количественной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов, в том числе методика предварительного анализа данных спутниковой СВЧ радиометрии с использованием картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ.
6. Выбрана спутниковая аппаратура, по своим характеристикам наиболее подходящая в качестве средства для получения оперативных СВЧ радиометрических данных в целях мониторинга мерзлых грунтов.
7. Валидация созданного программно-алгоритмического обеспечения показала, что его использование позволяет достичь большей точности восстановления значений термодинамической температуры грунтов в периоды стабильно мерзлого состояния грунтов и периоды интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги по сравнению с алгоритмами на основе регрессионных моделей.
8. Разработана методика идентификации ландшафтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии, позволяющая выявлять генеральные типы ландшафтов на основе информативных признаков, отражающих особенности временной изменчивости СВЧ излучательных свойств.
9. С помощью методики идентификации ландшафтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии определены пространственные границы области в пределах евразийского сектора Арктики, в которой разработанный метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов может быть использован без дополнительных мероприятий по валидации.
10. С помощью разработанного метода оценки исследована внутригодовая и межгодовая изменчивость состояния мерзлых грунтов на севере Западной Сибири. По имеющимся СВЧ радиометрическим данным на временном интервале 2003-2010 гг. не выявлено значимых трендов изменения температуры мерзлых грунтов, но обнаружена слабо выраженная тенденция к более раннему началу весенних процессов оттаивания грунтов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. **Методология спутниковой СВЧ-диагностики широтно-зональной и сезонной изменчивости мерзлых почвогрунтов и морского льда // Лед и снег. 2013. №1 (121). С. 73-82.**
2. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. **Возможности спутниковой СВЧ-радиометрии для широтно-зональной дифференциации ландшафтов Западной Сибири // Лесоведение. 2014. №5. С. 54-64.**
3. Мателенок И. В., Мелентьев В. В. **Векторно-координатный подход к определению геометрии визирования при учете влияния крупномасштабных неровностей поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Том 11. №4. С. 300-309. В печати.**
4. Melentyev V. V., Matelenok I. V. **Technique for latitudinal discrimination of Siberian landscapes based on satellite passive microwave data // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7. No. 7. P. 827-837. In press.**
5. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. **Межгодовая изменчивость состояния мерзлых почвогрунтов полуострова Ямал и ее количественная оценка на материале архива данных AMSR-E 2003-2010 гг. // Исследование Земли из космоса. 2015. №3 (принято к публикации).**
6. Мателенок И. В. **Применение радиотеплолокации для исследования пространственно-временной изменчивости состояния мерзлых почвогрунтов Северного полушария в условия глобальных изменений // Сборник трудов XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». СПб. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2011. С. 53-62.**
7. Мателенок И. В. **Некоторые результаты использования данных спутниковой СВЧ радиометрии для диагностики состояния многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых почвогрунтов Евразии // Сборник тезисов докладов международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2011). СПбГУ. СПб, 2011. С. 34.**
8. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. **Изменчивость состояния мерзлых почвогрунтов и других типов подстилающей поверхности Западной Сибири в пространственно-временных координатах: данные спутниковой СВЧ диагностики // Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2012. Т. 2. С. 249-257.**
9. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. **Многолетне- и сезонно-мерзлые почвогрунты Западной Сибири: методология и практика аэрокосмической дистанционной СВЧ диагностики в пространственно-временных координатах // Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром. 2012 г. С. 283-288.**
10. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. **Теория и практика спутникового СВЧ-мониторинга излучательных свойств многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых почвогрунтов Северной полярной области // Сборник докладов Научной**

сессии ГУАП, посвященной Всемирному дню космонавтики. Ч. 2. СПб. ГУАП. 9 – 11 апреля 2012 г. С. 123-126.

11. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. Исследование временной изменчивости радиояркой температуры подстилающей поверхности тундровых территорий с использованием усовершенствованной модели многослойной СВЧ излучающей среды / Материалы X всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов). Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012 г. С. 403.
12. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. Опыт спутниковой СВЧ широтно-зональной дифференциации ландшафтов таежной, лесотундровой и тундровой природных зон Западной Сибири // Доклады V Всероссийской конференции (с международным участием) «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве», посвященной памяти выдающихся ученых-лесоведов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина. Москва. 22-24 апреля 2013 г. С. 183-187.
13. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. Опыт спутниковой СВЧ диагностики почвогрунтов // Вопросы радиометеорологии: сб. статей памяти В.Д. Степаненко. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, ООО «Изд-во «Балтийская печать». 2013 г. С. 283-304.
14. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. Распознавание границ периодов внутригодовой изменчивости состояния почвогрунтов тундровой зоны по данным спутниковой СВЧ съемки // Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». СПб. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2014. Т. 2. С. 332-339.
15. Мелентьев В. В., Мателенок И. В. Технология спутникового СВЧ мониторинга почвогрунтов Арктики // Сборник трудов XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», посвященной 100-летию со дня рождения профессора В.М. Полякова. Иркутск. 29 июня – 5 июля 2014 г. С. 222-225.
16. Melentyev V. V., Matelenok I. V. Frozen grounds: improved theoretical model of emissivity in microwave and changing of the parameters by using AMSR-E // Proceedings of the Lahti Symposium «Seasonal Snow and Ice». Lahti. 28 May – 01 June 2012. Digital media (Flash-drive and web-site).
17. Melentyev V. V., Matelenok I. V. Permafrost and seasonally frozen grounds in changing climate: revealing of the parameters modification with using passive microwave survey // Proceedings of the 3rd International SPACE World Conference. Frankfurt/Main. November 6 – 8, 2012. 15 p. Digital media (CD).