

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического приборостроения»

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук,
профессор
Мелентьев Владимир Владимирович

Санкт-Петербург

2015

Содержание

Введение.....	5
1 Теоретические основы мониторинга мерзлых грунтов Арктики с применением спутникового СВЧ радиометрического метода.....	12
1.1 Общая характеристика мерзлых грунтов Арктики	12
1.2 Параметры состояния мерзлых грунтов Арктики.....	13
1.3 Электрические и радиофизические свойства мерзлых грунтов	15
1.4 Опыт исследований грунтов Арктики с использованием средств спутниковой СВЧ радиометрии	19
1.5 Методы и средства дистанционного зондирования в современных системах мониторинга сезонно-мерзлых и многолетнемерзлых грунтов	22
1.6 Формализация требований к методу оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии.....	25
1.7 Выбор спутниковой аппаратуры дистанционного зондирования для получения оперативных СВЧ радиометрических данных	28
1.8 Выводы по разделу.....	31
2 Разработка метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии	33
2.1 Исходные данные	33
2.1.1 Спутниковые СВЧ радиометрические данные.....	33
2.1.2 Данные со спутниковых средств видимого и ИК диапазонов.....	36
2.1.3 Данные контактных измерений	37
2.1.4 Картографические данные	38
2.2 Выбор тестовых полигонных участков в «ключевых» для мониторинга состояния мерзлых грунтов Арктики районах	39
2.2.1 Северо-восток Европейской территории России, север Западной Сибири и северо-восток Восточной Сибири как «ключевые» районы евразийского сектора Арктики	39
2.2.2 Тестовые трансекты.....	39
2.2.3 Полигонные тестовые участки.....	45
2.3 Выбор индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов и подходов к определению их значений на основе комплексного анализа данных спутниковых СВЧ радиометрических и наземных контактных измерений.....	48
2.3.1 Выбор индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов.....	48
2.3.2 Выбор подходов к определению значений индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов.....	60

2.4	Разработка модели собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера»	65
2.4.1	Описание радиояркой температуры многослойной среды «грунт-снег-атмосфера»	65
2.4.2	Описание диэлектрических свойств слоев многослойной среды	68
2.4.3	Учет влияния макрорельефа земной поверхности на СВЧ излучательные свойства многослойной среды «грунт-снег-атмосфера»	70
2.5	Валидация модели собственного СВЧ излучения многослойной среды	77
2.6	Выводы по разделу	84
3	Разработка программно-алгоритмического и методического обеспечения для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики	86
3.1	Алгоритм оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии	86
3.1.1	Обобщенная структура алгоритма	86
3.1.2	Блок распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии	87
3.1.3	Блок восстановления значений термодинамической температуры грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии	90
3.2	Разработка программного обеспечения для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии	93
3.3	Методика предварительного анализа данных спутниковой СВЧ радиометрии с использованием картосхем пространственно-временной изменчивости радиоярких температур	95
3.4	Методика автоматизированной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов	102
3.5	Валидация программно-алгоритмического обеспечения для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики	104
3.6	Выводы по разделу	111
4	Определение пространственных границ применимости метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики и его апробация	113
4.1	Определение пространственных границ применимости метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики с помощью методики автоматизированной идентификации ландшафтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии	113
4.1.1	Введение	113
4.1.2	Используемые алгоритмы и наборы информативных признаков	115
4.1.3	Тестовые испытания алгоритмов и наборов информативных признаков	121

4.1.4	Формирование и испытание результирующей методики автоматизированной СВЧ идентификации ландшафтов.....	125
4.2	Апробация разработанного метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов на территории полуострова Ямал.....	132
4.3	Выводы по разделу.....	148
	Заключение.....	150
	Список литературы	152

Введение

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 [16], 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) [18, 50].

Сети геоэкологических 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) [9, 23, 53, 67]. Для мониторинга грунтов в региональном и глобальном масштабе в наибольшей степени подходят спутниковые СВЧ радиометры, важным преимуществом которых перед радарными 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 [63], 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

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

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, геокриологии 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.

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 [26-29, 31, 32, 34, 35, 38-42, 105-107], из них две статьи [29, 34] – в изданиях из списка, рекомендованного ВАК РФ, две работы в изданиях из списка ВАК [28, 107] находятся в печати; еще одна работа [33] принята к публикации.

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 в [96].

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.

Во введении обоснована актуальность работы, выполнена постановка цели и задач исследования, рассмотрены вопросы научной новизны и практической значимости, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассмотрены теоретические основы мониторинга мерзлых грунтов Арктики с применением спутникового СВЧ радиометрического метода. Дана характеристика объекта мониторинга – распространенных в Арктике ММГ и СМГ. На материале литературных источников показаны связи основных параметров состояния мерзлых грунтов, таких как термодинамическая температура и объемная влажность, с их электрическими и радиофизическими свойствами, позволяющие осуществлять количественную оценку изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным спутниковой СВЧ съемки. Кратко описан опыт исследований грунтов Арктики с использованием средств СВЧ радиометрического зондирования, приведен обзор существующих систем мониторинга СМГ и ММГ. Сформирован список требований к методу оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии. В результате анализа характеристик действующей спутниковой аппаратуры с учетом этих требований в качестве средств для получения данных о состоянии мерзлых грунтов выбраны СВЧ радиометры AMSR-E и AMSR-2.

Второй раздел посвящен разработке метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии. Обосновано

использование для целей оперативного мониторинга мерзлых грунтов спутниковых СВЧ радиометрических данных уровня обработки L3. Выбраны источники опорных данных, необходимых для валидации разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения. Приведено краткое описание климатических и геокриологических условий в «ключевых» для мониторинга мерзлых грунтов районах Арктики: на северо-востоке Европейской территории России (ЕТР), севере Западной Сибири (ЗС) и северо-востоке Восточной Сибири (ВС). В ходе комплексного анализа спутниковых СВЧ радиометрических и наземных опорных данных для тестовых участков, расположенных в пределах этих районов вблизи действующих ГКС и ГМС, выбраны индикаторы изменчивости состояния мерзлых грунтов и подходы к определению их значений. Разработана модель собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера», позволяющая учитывать влияние макрорельефа земной поверхности на ее СВЧ излучательные свойства.

В третьем разделе описано разработанное программно-алгоритмическое и методическое обеспечение для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии: алгоритм и программа оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов на основе модели собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера», методика предварительного анализа спутниковых СВЧ радиометрических данных, методика автоматизированной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов. Для выбранных тестовых участков на материале архива данных СВЧ радиометра AMSR-E за 2005-2008 гг. с привлечением опорной информации с ГКС и ГМС выполнена валидация программно-алгоритмического обеспечения.

В четвертом разделе определены границы географической области, в которой разработанный метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов может быть использован без дополнительных мероприятий по валидации. Для решения этой задачи разработана методика автоматизированной идентификации ландшафтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным. Подробно рассмотрены вопросы определения набора информативных признаков, позволяющего достигнуть максимальной эффективности идентификации, а также оценки работоспособности двух альтернативных алгоритмов автоматизированной классификации в «ключевых» районах Арктики при использовании разных наборов признаков. Также в разделе представлены результаты использования разработанного метода для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов на территории п-ова Ямал в 2003-2010 гг.

В заключении описаны основные результаты диссертационной работы.

1 Теоретические основы мониторинга мерзлых грунтов Арктики с применением спутникового СВЧ радиометрического метода

1.1 Общая характеристика мерзлых грунтов Арктики

Традиционно для обозначения части земного шара к северу от Полярного круга (к северу от параллели $66,56^\circ$ с.ш.) используется термин «Арктика» в его классическом толковании. Согласно другому определению, южная граница Арктики на суше совпадает с южной границей тундры [57]. В контексте настоящей работы термин «Арктика» обозначает определенную выше циркумполярную область севернее $66,56^\circ$ с.ш.

Установленная граница делит северное полушарие на область, где минимум в течение одних суток в году наблюдается полярный день (т.е. в течение 24 и более часов Солнце не пересекает линию горизонта) – Арктику, и область, где описанное явление не фиксируется [52]. Продолжительность светового дня определяет количество поступающей солнечной радиации и детерминирует климатические и геофизиологические условия.

Согласно ГОСТ 25100-95, грунтами называются горные породы, почвы, техногенные образования, представляющие собой многокомпонентные и многообразные геологические системы и являющиеся объектами инженерно-хозяйственной деятельности человека. Среди мерзлых грунтов по длительности нахождения в мерзлом состоянии выделяют следующие типы: многолетнемерзлые, сезонно-мерзлые, кратковременно-мерзлые. Большую часть суши в пределах Арктики занимают тундры, подстилаемые многолетнемерзлыми грунтами. В настоящее время существует несколько определений термина «многолетнемерзлый грунт». Согласно [17, 60, 65], ММГ считается грунт, на протяжении не менее двух лет непрерывно имеющий отрицательную температуру и содержащий воду в твердом (кристаллическом) состоянии. В соответствии с другим толкованием термина, к ММГ относятся грунты, температура которых не поднимается выше 0°C в течение двух и более последовательных лет (но в них может не быть льда) [57, 58]. В диссертационном исследовании за основу принято последнее толкование. Сезонно-мерзлыми считаются грунты, ежегодно промерзающие на промежуток времени длительностью в несколько суток и более. СМГ встречаются в основном в западной части евразийского сектора Арктики.

При движении с запада на восток евразийского сектора Арктики область сезонного промерзания грунтов сменяется зонами редкоостровной, островной, прерывистой и сплошной мерзлоты, вместе образующими область распространения ММГ (в которую

входят также и территории за пределами Арктики). Южная граница области распространения ММГ представляет собой условную линию, отделяющую территории, на которых такие породы встречаются, от областей, где их существование невозможно. В Евразии эта линия смещается к югу при движении с запада на восток.

В структуре толщ ММГ и СМГ выделяется деятельный слой, в котором происходят ежегодные циклические процессы промерзания-оттаивания. Для ММГ этот слой называется сезонно-талым (СТС), для СМГ – сезонно-мерзлым (СМС). Исходя из расположения горизонтов ММГ различают сливающиеся (СТС соприкасается с постоянно-мерзлым слоем (ПМС)), несливающиеся (верхняя граница ПМС не совпадает с нижней границей СТС) и слоистые многолетнемерзлые толщи [17]. Ниже СТС и ПМС на глубине от нескольких метров до полукилометра расположена верхняя граница постоянно-немерзлого горизонта, в отдельных случаях подстилаемая реликтовыми мерзлыми породами.

1.2 Параметры состояния мерзлых грунтов Арктики

Мерзлые грунты являются сложными многокомпонентными системами, включающими в себя органоминеральную (твердую), жидкую, газообразную и биотическую составляющую. Присущие грунтам особенности, проявляющиеся во взаимодействии с материей (веществами, полями различной физической природы) и являющиеся источником сходства и различия грунтов, согласно [59], называются свойствами. Все многообразие свойств грунтов сводится к нескольким основным их классам: химическим, физико-химическим, физико-механическим, физическим и биотическим. При этом в каждом из перечисленных классов выделяются стационарные и нестационарные свойства.

Как и все сложные системы, мерзлый грунт в конкретный момент времени может находиться в определенном состоянии, которое характеризуется большим количеством параметров. Такими параметрами состояния являются физические величины и нестационарные свойства мерзлого грунта (независимо от принадлежности к одному из классов свойств): термодинамическая температура T_{zp} , содержание жидкой влаги W (далее в работе обозначается термином «влажность»), степень минерализации порового раствора, льдистость, диэлектрическая проницаемость и т.д. [60]. Состояние СМГ и ММГ рассматривается в контексте их взаимодействия с другими компонентами геоэкосистем или человеческой деятельности, и оценка изменчивости состояния грунтов при решении

задач инженерной геокриологии, климатологии, гидрологии производится на основе различных наборов параметров состояния. Однако такие параметры состояния, как T_{zp} и W , играют особую роль практически во всех приложениях, так как в значительной степени определяют поведение системы при внешних воздействиях на нее (природных и антропогенных). Это обусловлено прежде всего наличием тесных взаимосвязей между данными параметрами и многими другими стационарными и нестационарными свойствами грунтов, а также высокой временной изменчивостью T_{zp} и W в сравнении с другими параметрами состояния (наиболее выраженной в деятельном слое).

В то же время, в Арктике грунты характеризуются существенной пространственной неоднородностью, затрагивающей широкий спектр параметров состояния и свойств, среди которых гранулометрический (дисперсный) состав, содержание химических веществ в поровом растворе, криогенная текстура и т.п. Из-за наличия сложных связей между T_{zp} , W и другими параметрами и свойствами такая неоднородность является источником различий в характере изменчивости состояния грунтов в разных точках пространства. В свете этого для оценки и прогнозирования изменчивости состояния мерзлых грунтов даже на небольших по площади участках земной поверхности в Арктике требуется учет максимально широкого набора свойств грунтов.

Низкие значения термодинамической температуры являются основным условием существования льда в составе грунтов. Более строго данное условие записывается следующим образом: $T_{zp} < T_{зам}$, где $T_{зам}$ – нижняя граница температурного диапазона интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги. $T_{зам}$ зависит от минерализации и гранулометрического состава. Наиболее низкой $T_{зам}$ характеризуются засоленные глинистые грунты, наиболее высокой – пески со слабоминерализованным поровым раствором [61, 62]. Наибольшие колебания T_{zp} фиксируются в СТС (СМС), где происходят сезонные циклические переходы поровых растворов из твердого состояния в жидкое и наоборот. В лежащем ниже ПМС (для СМГ – в постоянно-немерзлом слое) не наблюдается смена агрегатного состояния воды, однако до определенной глубины T_{zp} в течение года подвержена колебаниям. На глубине нулевых теплооборотов T_{zp} не меняется в разные сезоны и соответствует усредненной температуре постоянно мерзлых (для СМГ – постоянно-немерзлых) толщ. Вертикальное распределение температуры грунтов по глубине в течение года испытывает колебания и характеризуется геотермическим градиентом. Средняя температура мерзлых толщ отличается в разных частях Арктики: на западе евразийского сектора она может принимать значения $-0,5$ – -1°C , в Якутии – до -10°C [65].

Наличие связи между внутригодовыми колебаниями температуры поверхностных слоев грунта и среднегодовой температурой ПМС создает возможность для использования T_{sp} поверхностных слоев в качестве индикатора преобладания СМГ или ММГ на участках суши и показателя термического режима мерзлой толщи [2, 86, 98, 118]. Это особенно важно при контроле состояния ММГ с помощью спутниковой или авиационной СВЧ аппаратуры, так как даже в длинноволновой части СВЧ диапазона прямое получение информации о состоянии слоев грунтов, залегающих ниже СТС, затруднено.

Содержание жидкой воды W наряду с T_{sp} является одним из основных параметров состояния мерзлых грунтов. W относится к комплексу показателей содержания разных категорий воды в грунте, в который также входит общая влажность, максимальная влажность, содержание связанной (плотно- и рыхлосвязанной) воды, содержание свободной воды, льдистость и т.д. В разделах настоящей работы под W подразумевается объемная влажность, а не весовая, если это не оговорено отдельно в конкретном случае. Вода в составе грунта включает в себя свободную, конституционную (химически связанную), кристаллизационную, адсорбционную (физически связанную) воду. Все эти типы различаются физическими и физико-химическими свойствами (вязкостью, температурой замерзания и т.д.) и, как следствие, электрическими свойствами [10, 60]. Согласно данным работам, содержание разных типов воды в грунтах в значительной степени зависит от особенностей состава и структуры последних, в частности, от гранулометрического состава. Вследствие этого температурно-влажностные зависимости разных типов грунтов, описывающие характер связи между W и T_{sp} , также существенно отличаются друг от друга. Это также ведет к различиям в электрических и радиофизических свойствах грунтов, которые рассматриваются далее.

1.3 Электрические и радиофизические свойства мерзлых грунтов

Основными параметрами, определяющими поведение природных сред в электромагнитном поле, являются диэлектрическая и магнитная проницаемость, электрическая и магнитная проводимость. Эти электрические характеристики зависят от параметров состава, структуры, физических и физико-химических свойств грунтов и в то же время детерминируют их радиофизические характеристики, непосредственно оцениваемые при дистанционном СВЧ зондировании. При использовании в качестве инструментов мониторинга СМГ и ММГ средств пассивного и активного СВЧ зондирования наиболее важной электрической характеристикой грунтов является

комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП). Для описания диэлектрических свойств веществ в СВЧ диапазоне используются релаксационные формулы Дебая, позволяющие определить значения действительной и мнимой частей КДП в зависимости от частоты поля:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2\pi f \tau)^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2\pi f \tau)^2} \cdot 2\pi f \tau + \frac{\sigma}{2\pi \varepsilon_r f}, \quad (2)$$

где f – частота поля, σ – проводимость, ε_r – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε_{∞} – высокочастотная диэлектрическая постоянная, ε_0 – низкочастотная диэлектрическая постоянная, τ – время релаксации.

Поскольку грунты являются сложными многокомпонентными системами, для описания их диэлектрических свойств на основе свойств компонентов используются разнообразные модельные приближения, применение которых возможно в ограниченных диапазонах КДП компонентов и f поля. Наиболее распространенным способом модельного описания является представление слоев грунтов в виде условно гомогенных смесей. В таком случае для расчета результирующей КДП используются формулы Оделевского, Бруггемана-Ханаи, Брауна [67]. Формула Брауна, более известная как «рефракционная» модель, до 1990-х гг. считалась наиболее подходящей для описания смесей компонентов, существенно отличающихся друг от друга по величине диэлектрической проницаемости [109]:

$$\sqrt{\varepsilon_g} = \rho_w \sqrt{\varepsilon_w} + (1 - \rho_w) \sqrt{\varepsilon_c}, \quad (3)$$

где ε_g – КДП смеси, ε_w и ρ_w – КДП и плотность первого компонента, ε_c – КДП второго компонента.

Данная формула применима для описания в СВЧ диапазоне КДП грунтов как двухкомпонентных смесей воды с большой КДП и кристаллической основы (лед, минеральный скелет) с малой КДП. КДП жидкой воды практически постоянна при $f < 1$ ГГц и близка к 81, диэлектрические потери незначительны. Частотная изменчивость КДП воды ярко проявляется в СВЧ диапазоне, к верхней границе которого ε' снижается с 81 до 4-5, а ε'' проходит максимум, равный 37, при $f \approx 20$ ГГц. КДП минеральной основы грунтов разного состава в СВЧ диапазоне мала и меняется в зависимости от f незначительно [60]. Согласно [56], на $f = 4$ ГГц для монтмориллонита, основного компонента многих глинистых грунтов, $\varepsilon = 2,47 + 0,072j$ при влажности менее 1 % и

плотности $\rho = 1,23 \text{ г/см}^3$, а для искусственно дегидратированного кварцевого песка при $\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$ при $\varepsilon = 2,81 + 0,1i$. КДП чистого льда в СВЧ диапазоне также стабильна и принимает значения около $3,15 + 0,01i$. Следовательно, допустимо считать, что КДП рассматриваемой смеси зависит прежде всего от W . Как было показано ранее, W , в свою очередь, является функцией нескольких параметров, таких как температура, минерализация, соотношение количества частиц разных фракций. Насыщение порового раствора минеральными солями вызывает изменение диэлектрических свойств и напрямую.

В классической рефракционной модели не учитывается факт, что вода в грунтах может относиться к одному из видов связанной влаги. Эксперименты, проведенные рядом научных коллективов в 1990-х – 2000-х гг., показали существенные расхождения между измеряемыми в лабораториях и рассчитанными по формуле Брауна значениями КДП [7, 10, 21, 56, 110]. Для решения данной проблемы в указанных работах были предложены модели, позволяющие учесть наличие связанной воды в составе грунтов и обеспечить согласие между результатами измерений и вычислений КДП. Однако основные трудности в описании КДП свойств грунтов по-прежнему связаны с малой исследованностью температурно-влажностных зависимостей для разных типов грунтов в натуральных условиях [60]. Существенные сложности возникают и с измерениями КДП для природных сред, граничащих с грунтами: снежного покрова, растительности. В последнем случае проблема заключается как в организации измерений КДП живого организма, так и в неоднородности и высокой изменчивости диэлектрических параметров самой среды [19].

Как было упомянуто, диэлектрические свойства природных сред детерминируют их радиофизические свойства, в частности, излучательные свойства в СВЧ диапазоне. Согласно теории теплового излучения, в СВЧ диапазоне испускание абсолютно черным телом (АЧТ) равновесного излучения может быть описано длинноволновым приближением формулы Планка (аппроксимацией Релея-Джинса) [46]:

$$R(f, T) = \frac{2\pi kT}{\lambda^2}, \quad (4)$$

где R – спектральная плотность излучения, k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура, λ – длина волны.

Для описания излучения реальных («серых») тел введено понятие радиояркостной температуры (РЯТ), равной термодинамической температуре АЧТ, испускающего излучение такой же интенсивности, что и реальное, в выбранном направлении. Для протяженной условно бесконечной среды РЯТ представляется в виде произведения ее термодинамической температуры $T_{ин}$ и коэффициента излучения Σ на данной частоте,

зависящего прежде всего от КДП среды и свойств границ раздела между средами/слоями сред [96]:

$$T_{\text{я}}(f) = \Sigma(f) \cdot T_{\text{ин}} . \quad (5)$$

Излучательная способность природных сред в микроволновом диапазоне изменяется в широких пределах (в отличие от ИК области спектра), что позволяет различать объекты и по термодинамической температуре, и по Σ [30]. Коэффициенты излучения грунтов в СВЧ диапазоне зависят в первую очередь от содержания жидкой воды (свободной, рыхло- и плотносвязанной). Например, переход грунтов из мерзлого состояния в талое характеризуется увеличением количества жидкой влаги, что вызывает рост действительной и мнимой частей КДП и, соответственно, уменьшение значений Σ и РЯТ на $f = 6,9$ ГГц. Это подтверждено результатами многолетних исследований, выполнявшихся в лабораториях российских и зарубежных организаций [23, 67]. Согласно данным экспериментов, проводившихся с помощью установок «Эмиссия-1», «Эмиссия-2» на базе ГГО им. А.И. Воейкова, при зондировании в надир коэффициент излучения мерзлой почвы влажностью $W = 14\%$ при температуре $-0,4^{\circ}\text{C}$ на $f = 9,4$ ГГц равен $0,923$, оттаявшей почвы $W = 14\%$ при $T_{\text{сп}} = 0,4^{\circ}\text{C} - 0,892$ (таблица 1).

Как было сказано ранее, гранулометрический и физико-химический состав (в частности, содержание физической глины, песка, гумуса, засоленность) также определяет количество незамерзшей влаги. Как следствие, эти свойства детерминируют и коэффициенты излучения грунта при конкретной температуре [21, 23].

Спутниковыми СВЧ радиометрами фиксируются параметры восходящего микроволнового излучения системы «Земля-атмосфера». По измеряемым антенным температурам на основе установленных калибровочных соотношений определяются РЯТ этой системы на разных частотах зондирования. Согласно концепции «СВЧ климатологии», РЯТ является интегральной характеристикой, отражающей состояние системы «Земля-атмосфера» и отдельных ее компонентов [96]. По результатам оценки значений РЯТ посредством решения обратных задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [63] могут быть восстановлены значения коэффициентов излучения, физических, физико-химических и других параметров природных сред, в том числе грунтов. При СВЧ зондировании природных сред особое значение приобретает мультиспектральность аппаратуры и возможность поляризационной селекции сигнала, позволяющие снизить неопределенность в решении обратных задач в условиях недостатка априорной информации. Поэтому современные СВЧ радиометры в своем большинстве являются многоканальными спектрально-поляризационными комплексами.

Таблица 1 – Коэффициенты излучения естественных поверхностей на $f = 9,4$ ГГц (выдержка из [23])

Вид излучающей среды	Краткая характеристика образца	Σ
Мерзлая почва	$W = 14\%$, $T_{zp} = -0,4^\circ\text{C}$	0,923
Оттаявшая почва	$W = 14\%$, $T_{zp} = 0,4^\circ\text{C}$	0,892
Частично оттаявшая почва	$W = 32,5\%$ (у поверхности), толщина мерзлого слоя 6 см	0,927
Мерзлый грунт, покрытый травой	Толщина слоя 12 см	0,941
Сухой травяной покров	Толщина слоя почвы 20 см, высота травы 15-20 см	0,935
Мокрый травяной покров	Толщина слоя почвы 20 см, высота травы 15-20 см	0,89
Сухой снежный покров	Толщина слоя 20-30 см, плотность $0,404 \text{ г/см}^3$	0,956

Максимально возможное пространственное разрешение электрооптической или радиотехнической системы зондирования для круглой апертуры оценивается по следующему уравнению:

$$\Delta L = 0,61\lambda L / r. \quad (6)$$

где L – расстояние от фокуса до объекта на поверхности Земли, λ – длина волны принимаемого излучения, r – радиус апертуры (действующего отверстия фокусирующей системы – рефлектора или линзы). Данная формула выражает дифракционное ограничение разрешения спутникового измерительного средства. Из-за данного ограничения пространственное разрешение спутниковых СВЧ радиометрических систем оказывается существенно сниженным по сравнению с системами видимого и ИК диапазона.

1.4 Опыт исследований грунтов Арктики с использованием средств спутниковой СВЧ радиометрии

Первый опыт спутниковой СВЧ съемки поверхности суши в Арктике относится к концу 1960-х – началу 1970-х гг., когда на орбиту были запущены советские искусственные спутники Земли (ИСЗ) «Космос-243», «Космос-384», оснащенные многоканальными СВЧ радиометрическими комплексами. В рамках этих пилотных экспериментов сотрудниками Государственного научно-исследовательского центра изучения природных ресурсов (ГосНИЦИПР) была построена, по-видимому, первая в

мире СВЧ карта положения границ областей сплошной и прерывистой мерзлоты [5], предложена методика оперативного подсчёта площади дрейфующего льда в Северном Ледовитом и Южном океанах [96].

В последующие десятилетия метод пассивного микроволнового зондирования (СВЧ радиометрии), предложенный выдающим советским ученым К.С. Шифриным, профессором Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А.И.Воейкова [123], был широко внедрен в практику исследований системы «Земля-атмосфера» как в СССР, так и за рубежом [4, 9, 14, 23, 67, 79, 89, 122]. Во многом это стало возможным благодаря запуску новых ИСЗ, на борту которых была установлена аппаратура с улучшенным пространственным и временным разрешением (ИСЗ Nimbus-7, DMSP). В рамках проектов по созданию новых методов и средств мультиспектрального СВЧ зондирования земной поверхности спутниковая СВЧ съемка сопровождалась наземными экспериментами в контролируемых условиях с целью изучения связей между физическими, физико-химическими и радиофизическими свойствами природных и техногенных объектов [23, 30, 37]. Одновременно велась разработка моделей переноса излучения, позволяющих оценивать значения излучательной способности многослойных сред при положительных и отрицательных температурах, создавались алгоритмы восстановления значений физических параметров грунтов, льда, растительного и снежного покрова по СВЧ данным [21, 36, 48]. Со второй половины 1960-х по 1980-е годы были выполнены серии экспериментов по широкомасштабному картированию территорий евразийского сектора Арктики на подспутниковом уровне – с борта самолета-лаборатории ГГО им. А. И. Воейкова [23]. Начиная с 1990-х гг. значительные усилия прилагаются к разработке новых методов дистанционной диагностики многослойных сред в зоне распространения ММГ [95, 96], что связано с потребностями в точной документальной информации об их состоянии в условиях глобальных климатических изменений [120].

Список частных задач мониторинга грунтов в Арктике и за ее пределами, решаемых средствами спутникового мультиспектрального СВЧ зондирования, в последние два десятилетия был существенно расширен. Так, в работах [73, 100, 136] предложены подходы к обнаружению процессов таяния грунтов и снежного покрова по СВЧ радиометрическим данным на основе спектрального градиента показаний разночастотных каналов, в работе [77] – на основе сезонного градиента РЯТ, в результате позволившие получить многолетние архивы данных о глобальном распределении областей таяния и промерзания на земном шаре. В работах [11, 21] подробно рассмотрены вопросы учета особенностей химического и гранулометрического состава грунтов, свойств грунтовой влаги при восстановлении значений температуры и влажности

грунтовых слоев по СВЧ данным, с помощью многоканальной СВЧ радиометрии изучены процессы промерзания и оттаивания грунтов разной структуры. В [102, 103, 108] предложен новый подход к оценке долговременных тенденций изменения состояния СМГ и ММГ по пассивным микроволновым данным с ИСЗ, основанный на анализе контрастов РЯТ по пространственным и временным профилям и определении сумм РЯТ в зимние периоды стабильно мерзлого состояния грунтов. В исследованиях [69, 94] разработаны алгоритмы восстановления температуры грунтов в полярных и субполярных регионах на основе спектральных и поляризационных различий излучательных свойств многослойных сред по данным с сенсоров AMSR-E и SSM/I. В недавней работе [47] восстановление значений температуры деятельного слоя тундровых грунтов выполнено по данным спутникового СВЧ радиометра L-диапазона SMOS-MIRAS ($f = 1,4$ ГГц). Отдельное направление исследований представлено работами по моделированию термического режима толщ ММГ согласно граничным условиям, задаваемым восстановленными по спутниковым данным значениями температуры поверхности грунтов [98, 118].

В моделях переноса излучения, положенных в основу современных алгоритмов восстановления значений параметров грунтов, разными способами осуществляется описание неоднородностей среды [91, 132]. Упрощенное представление грунтового и растительного слоя, основанное на допущении о малой выраженности эффектов рассеяния, было предложено в работах [64, 67]. Данный подход широко применяется благодаря относительной простоте реализации вычислительных процедур при решении обратных задач ДЗЗ [94, 117, 134]. В работах [82, 135] используются некогерентные модели переноса излучения, слой растительности представляется в виде множества дискретных элементов простой формы (диски, цилиндры), характеризующихся определенными геометрическими параметрами и диэлектрическими свойствами. Учет шероховатости поверхности грунтов также производится различными способами [76]. Для этого используются хорошо известные модельные описания, широко применяемые в области зондирования взволнованной водной поверхности – модель Кирхгофа, модель малых возмущений, двухмасштабная модель [9, 99]. Во многих случаях учет шероховатости осуществляется путем введения поправочных эмпирических коэффициентов [78, 111]. Ряд новых подходов, описанных в [132], положен в основу алгоритмов, с помощью которых в настоящее время производятся стандартные спутниковые СВЧ продукты SMC (Soil Moisture Content) для общедоступных обновляемых баз данных о влажности грунтов [115].

Важным этапом развития дистанционных исследований области распространения ММГ стало создание в 2009 г. системы мониторинга DUE permafrost, более подробное

описание которой содержится в следующем разделе [90]. Она является первой глобальной системой наблюдения за состоянием ММГ, ориентированной на широкомасштабное использование данных спутникового зондирования, и обеспечивает оперативное комплексирование информации из разных источников о динамике параметров многослойных сред в Арктике и за ее пределами.

1.5 Методы и средства дистанционного зондирования в современных системах мониторинга сезонно-мерзлых и многолетнемерзлых грунтов

Согласно ГОСТ Р 22.1.02-95, мониторингом (применительно к окружающей среде и отдельным ее компонентам) называется система наблюдений и контроля, проводимых регулярно, по определенной программе для оценки состояния окружающей среды, анализа происходящих в ней процессов и своевременного выявления тенденций ее изменения.

Современный этап наблюдений за состоянием СМГ и ММГ характеризуется усилением тенденций к созданию глобальных сетей мониторинга и переходом к использованию методов дистанционной диагностики наряду с методами контактных измерений параметров грунтов.

Измерения температуры поверхности грунта T_{nn} и температуры грунта T_{gp} на регламентированных глубинах, выполнявшиеся на метеостанциях СССР в пределах области распространения ММГ в 1960-е – 1980-е гг., в 1990-е гг. были исключены из программы наблюдений на большинстве таких площадок. Несмотря на успешные попытки возобновления измерений T_{nn} и T_{gp} на ряде ГМС (в основном в областях сезонного промерзания грунтов), для значительной части территории России в настоящее время такие данные недоступны. На действующих станциях РФ, работающих в сети World Meteorological Organization (WMO), где измерения T_{nn} и T_{gp} входят в программу наблюдений, автоматизация процесса измерений практически отсутствует [2].

Скважинные измерения температурного режима толщ ММГ в настоящее время осуществляются согласно программе мониторинга многолетней мерзлоты GTN/P (The Global Terrestrial Network For Permafrost), инициированной в рамках Международного полярного года 2008-2009. Программа регламентирует проведение измерений преимущественно в ненарушенных условиях с использованием единой методики и максимальной унификацией инструментального обеспечения. К данным измерений

организован открытый доступ. Программа объединяет большое количество площадок в разных точках земного шара (в большинстве случаев организованных в 1960-е – 1980-е гг.) и является основным источником информации о температурах ММГ на глубинах до 20 м. Значительная часть измерительных скважин расположена на северо-востоке ЕТР, на севере ЗС, в Юго-Восточной Сибири и на северо-востоке ВС вдоль побережья Северного Ледовитого океана (СЛО). Несмотря на отсутствие объектов сети мониторинга на обширных территориях Центральной и Восточной Сибири, устойчивое функционирование станций в других «ключевых» районах позволяет обеспечить непрерывный контроль состояния параметров ММГ там, где согласно результатам моделирования ожидается наибольший отклик ММГ на антропогенную активность и климатические изменения [2,18, 70].

Помимо температуры грунтов на разных глубинах, важную информацию о состоянии мерзлых толщ несет глубина деятельного слоя, крайне чувствительный к изменениям климата параметр. Для выполнения режимных наблюдений за мощностью этого слоя в середине 1990-х годов был запущен проект CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring – циркумполярный мониторинг деятельного слоя) [75]. В рамках него в северном полушарии было создано более полутора сотен площадок, образующих иерархическую систему мониторинга, включающую пять уровней: глобальный, региональный, ландшафтный, фациальный и дистанционный. Выбор и подготовка площадок для проведения измерений осуществляется согласно принципам глобальной иерархической системы наблюдений по критериям максимальной репрезентативности участков по отношению к окружающим ландшафтным комплексам. Это позволяет оценивать изменчивость деятельного слоя в локальном масштабе и экстраполировать выявленные тенденции на региональный и глобальный масштаб. Измерения на площадках ландшафтного и фациального уровня проводятся по специальной методике в узлах регулярной сетки, что обеспечивает охват различных сочетаний гидрологических, ландшафтных, геокриологических условий и повышение репрезентативности таких измерений. Измерения проводятся с помощью мерзлотных щупов, мерзлотомеров и автоматических логгеров. Методика предусматривает зондирование щупом во всех узлах сетки минимум 1 раз в сезон и точечные наблюдения за временной динамикой температуры грунтов с шагом 1 сутки и менее на разной глубине с использованием логгеров [124]. Кроме того, на площадках CALM проводятся измерения льдистости и влажности образцов грунта, исследуется растительный и снежный покров.

К объектам мониторинга ММГ относятся и традиционные ГКС, на которых реализуются наиболее полные программы наблюдений за параметрами природных сред в

области распространения ММГ: геокриологическими, метеорологическими, гидрологическими и биотическими [51]. В настоящее время расположение стационаров на территории РФ крайне неравномерное и не позволяет осуществлять надежные региональные оценки изменчивости ММГ. Тем не менее, большая длина рядов инструментальных измерений с таких объектах делает возможным исследование долгопериодных изменений состояния ММГ в локальном масштабе.

Проект Permafrost Европейского Космического Агентства, инициированный в рамках программы DUE (Data User Element) в 2009 г., нацелен на создание и испытание системы мониторинга ММГ, в которой наиболее полно задействуются дистанционные методы исследования природных сред [72, 90]. Система спроектирована как интегратор информации о состоянии ММГ из разных источников и ориентирована на активное участие пользователей в формировании системы и производстве конечных продуктов. Проект предполагает использование специализированных web-сервисов для доступа к данным мониторинга. В настоящее время проект завершен, созданная система функционирует в оперативном режиме. Поддержка системы осуществляется организациями-партнерами и сообществом пользователей. Одной из важных особенностей системы является широкое использование данных, предоставляемых другими международными программами и исследовательскими организациями. Спутниковые продукты LST (Land Surface Temperature – температура поверхности суши), SSM (Surface Soil Moisture – влажность поверхностного слоя грунта) и Freeze/Thaw (мерзлый-талый статус поверхности суши), получаемые из архивов организаций-партнеров, подвергаются процедуре валидации по результатам измерений, выполняемых контактными методами на площадках глобальных сетей GTN/P, CALM.

Для оценки результатов спутникового мониторинга в рамках проекта до настоящего времени не использовались стандартизированные методики. Эксперименты по валидации и интеркалибровке данных измерений и моделирования в каждом случае проводятся в индивидуальном порядке с применением максимально широкого арсенала методов и наиболее полных массивов априорных данных об исследуемых территориях. Эксперименты в основном сосредоточены на пяти регионах, позиционируемых как «ключевые»: побережье моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, Якутском регионе, севере ЗС, меридиональном трансекте на Аляске, долине реки Маккензи.

Система DUE Permafrost открыла новые возможности в организации инфраструктуры анализа разнородных данных о состоянии ММГ. Однако небольшое число тестовых полигонов и необходимость создания стандартизированных методик, дальнейшей оптимизации работы отдельных алгоритмов (в частности, алгоритма для

определения влажности грунтовых слоёв по данным СВЧ инструментов – спутниковых скаттерометров и РСА) в настоящее время еще не позволяют считать данную систему надежным средством мониторинга, пригодным для решения задач непрерывного контроля параметров ММГ. Тем не менее, данная программа выгодно отличается от других программ и систем мониторинга ММГ, рассмотренных выше, не обеспечивающих достаточного пространственного охвата и не предусматривающих полноценного использования дистанционных методов исследования природных сред наряду с контактными.

1.6 Формализация требований к методу оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии

Исходя из рассмотренных выше особенностей объекта мониторинга (мерзлых грунтов Арктики) и метода СВЧ радиометрии были выделены основные препятствия и возмущающие факторы для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии:

1. Существенная пространственная неоднородность свойств грунтов и характеристик сопряженных сред (растительности, снежного покрова и т.д.);
2. Низкое пространственное разрешение спутниковых СВЧ радиометров, обусловленное дифракционными ограничениями;
3. Сложность решения обратных задач восстановления значений параметров грунтов, относящихся к классу некорректных;
4. Трудности в получении наземной опорной информации, вызванные разреженностью сетей наблюдений за параметрами природных сред в Арктике.

Развитие методологии спутниковых СВЧ радиометрических исследований привело к появлению различных подходов к восстановлению значений параметров состояния грунтов и оценке его изменчивости по данным СВЧ радиометрии (в основном ориентированных на использование на территориях, лежащих за пределами Арктики). В то же время, обозначенные выше проблемы, эффективное решение которых на современном этапе не представляется возможным, не позволило существенно повысить точность методов восстановления, выражаемую разницей между результатами восстановления значений параметров состояния мерзлых грунтов по данным СВЧ радиометрии и опорными значениями этих параметров, полученными в квазисинхронном

режиме контактными методами в соответствующих подспутниковых точках. В большинстве своем существующие методы восстановления значений параметров грунтов и оценки изменчивости их состояния имеют значительные региональные ограничения.

Как следует из краткого литературного обзора, представленного в разделе 1.4, спутниковые СВЧ радиометры в основном используются для определения влажности грунтов в талом состоянии, мерзлого/талого статуса грунтов, и в меньшей степени – для определения T_{zp} . Определение численных значений T_{zp} (как основного параметра состояния мерзлых грунтов) производится путем решения обратных задач дистанционного зондирования в условиях априорного недостатка информации. Данные задачи в основном решаются с помощью алгоритмов, построенных на базе статистических (регрессионных) моделей или моделей собственного СВЧ излучения многослойных сред.

В работе [94] рассмотрены оба этих подхода к восстановлению значений T_{zp} . Значения T_{zp} определяются раздельно для мерзлого (1) и талого (2) состояния грунтов по данным спутникового СВЧ радиометра AMSR-E. Один из разработанных методов восстановления использует модель множественной регрессии, другой – модель собственного излучения многослойной среды, включающей в себя грунт, снежный покров в периоды 1, грунт и растительный покров – в периоды 2. Результаты восстановления для ряда участков, расположенных в Арктике (в американском ее секторе) и за ее пределами, хорошо согласуются с опорными данными стационарных наблюдений в периоды талого состояния грунтов. Среднеквадратическая ошибка (СКОш) восстановления в этом случае не превышает 2,2-5,0 К, однако точность восстановления оказывается выше для метода на основе модели собственного СВЧ излучения среды. В периоды мерзлого состояния грунтов наблюдается обратная ситуация, а СКОш увеличивается до 6-10 К.

В работе [47] для восстановления значений T_{zp} на полигонном участке в американском секторе Арктики использованы данные поляризационно-угловых измерений одночастотного 1,4 ГГц СВЧ радиометра с синтезированной апертурой, размещенного на борту ИСЗ программы Soil Moisture – Ocean Salinity (SMOS). Разработанный на основе полуэмпирической модели собственного излучения среды L-MEB метод и алгоритм восстановления T_{zp} позволил оценить значения T_{zp} для дискретных временных рядов. Небольшая величина выборки РЯТ и охват ей лишь одного периода стабильно мерзлого состояния грунтов позволили снизить СКОш восстановления температуры до 2,4 К. В то же время, точность метода в периоды годового цикла, когда происходят интенсивные фазовые переходы грунтовой влаги, не была оценена, что требует проведения его дополнительных испытаний.

В системе DUE Permafrost значения термодинамической температуры поверхностного слоя грунта (точнее, температуры подстилающей поверхности $T_{ик}$ – из-за малой толщины скин-слоя вместо яркостной температуры грунта в большинстве случаев регистрируется яркостная температура снежного покрова, растительности) восстанавливаются по данным тепловой съемки ИК диапазона со спектрорадиометра Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) и сканирующего радиометра Advanced Along-Track Scanning Radiometer (AATSR). Данные СВЧ диапазона используются в основном для оценки влажности грунтов в талом состоянии и определения мерзлого/талого статуса грунтов. Применяемые в системе двухканальные методы восстановления значений $T_{ик}$ позволяют получать оценку численных значений данного параметра со СКОш 3-7 К по отношению к данным ре-анализа. Стоит отметить, что в периоды стабильно мерзлого состояния грунтов точность восстановления уменьшена по сравнению с другими периодами годового цикла (СКОш может превышать 7 К). Кроме того, оперативность оценки ежедневных изменений термодинамической температуры подстилающей поверхности ограничена влиянием облачности, непрозрачной в ИК диапазоне.

Таким образом, рассмотрение ряда современных методов оценки значений T_{ep} и ее изменчивости по спутниковым данным СВЧ и ИК диапазона показало, что точность восстановления значений параметров состояния мерзлых грунтов оказывается снижена либо в периоды стабильно мерзлого состояния грунтов, либо в периоды интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги. По мнению автора, это происходит вследствие незрелости дифференцированных подходов к восстановлению значений параметров состояния грунтов в разные периоды годового цикла, а также из-за отсутствия учета связей между последовательными состояниями СВЧ излучающей среды.

Исходя из выявленных проблем сформирован список требований к разрабатываемому методу оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии. В него были включены следующие требования:

- 1) Метод должен обеспечивать близкую точность восстановления значений T_{ep} в периоды стабильно мерзлого состояния грунтов и в периоды интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги, сопоставимую с максимальной точностью существующих передовых методов;
- 2) С учетом сложности решения обратных задач восстановления значений параметров состояния мерзлых грунтов метод должен предусматривать возможность выполнения предварительной визуальной оценки получаемых со спутника СВЧ данных;

- 3) Для получения информации о максимальном по толщине слое грунта при минимальном влиянии атмосферы, снежного и растительного покрова без существенного уменьшения пространственного разрешения метод должен использовать СВЧ радиометрические данные с частотных каналов 6-8 ГГц [67];
- 4) Метод должен быть ориентирован на использование СВЧ данных не только с уже эксплуатируемых, но и с перспективных ИСЗ, в том числе отечественных.

1.7 Выбор спутниковой аппаратуры дистанционного зондирования для получения оперативных СВЧ радиометрических данных

Основой инструментального обеспечения метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики является аппаратура, позволяющая получать исходные данные о природных средах в региональном и глобальном масштабе. Ее выбор основан на сформулированных требованиях к разрабатываемому методу, анализе технических характеристик функционирующих и перспективных спутниковых СВЧ радиометров, а также на оценке возможности оперативного получения с них данных через интернет-сервисы.

Список основных требований к спутниковому СВЧ радиометру и сопутствующей инфраструктуре СВЧ данных как к основному средству получения информации о мерзлых грунтах Арктики включает в себя шесть позиций:

- 1) Мультиспектральность;
- 2) Наличие в СВЧ радиометре спектральных каналов с $f = 6-8$ ГГц, наиболее подходящих для мониторинга грунтов;
- 3) Максимальное пространственное, радиометрическое и спектральное разрешение сенсора;
- 4) Максимально широкая полоса обзора СВЧ радиометра и наименьшее время, требуемое на покрытие съемкой всей поверхности Земли;
- 5) Максимальная длина доступных временных рядов СВЧ измерений, выполненных одним сенсором, а также выполненных сенсорами одной серии, прошедшими интеркалибровку.
- 6) Возможность оперативного получения через интернет-сервисы калиброванных СВЧ данных с разной глубиной предварительной обработки.

В настоящее время на орбите находится несколько ИСЗ, оснащенных СВЧ радиометрами. К ним относятся спутники Метеор-М №1 (сенсор МТВ3А), JCOM-W

(сенсор AMSR-2), DMSP F-17 (сенсор SSMIS), Aqua (сенсор AMSR-E), SMOS (сенсор MIRAS) и др. Помимо оперативных данных с перечисленной аппаратуры, для анализа доступны многолетние архивы дистанционных измерений с СВЧ радиометров, выведенных из эксплуатации: SMMR (ИСЗ Nimbus-7), SSM/I (ИСЗ DMSP F8-F13), AMSR (ADEOS).

По основным конструктивным решениям современные спутниковые СВЧ радиометры сходны между собой. Сканирование ведется механическим способом с помощью качающейся параболической антенны. Вблизи фокуса антенны располагается ряд облучателей, отвечающих за прием сигналов разной частоты, с поляризационной селекцией сигнала [46]. Существенно отличается от других СВЧ радиометров по конструкции одночастотный 1,4 ГГц сенсор MIRAS (ИСЗ SMOS) с Y-образной сборной антенной из рупорных элементов и синтезируемой апертурой [80].

Несмотря на сходства в конструктивной схеме, мультиспектральные СВЧ радиометры имеют разные наборы частотных каналов, параметры сканирования, размеры антенн, в свою очередь определяющие пространственное и спектральное разрешение получаемых данных (таблица 2).

СВЧ радиометр AMSR-E, установленный на борту ИСЗ Aqua, функционировал в плановом режиме с 2002 г. до 4 октября 2011 г. После продолжительного периода простоя вследствие отключения из-за повышенного трения в узлах вращения зеркала в декабре 2012 г. он продолжил работу с пониженной скоростью сканирования. Особенностью данного инструмента является прежде всего повышенное пространственное разрешение (размер мгновенной области обзора на частоте 89 ГГц равен 4x6 км) [92]. С появлением AMSR-E были созданы прогрессивные алгоритмы по определению концентрации морского льда по мультиспектральным СВЧ данным (ASI, DTU, Norsex), позволившие генерировать полушарные спутниковые ледовые карты улучшенной детализации [71, 126]. Преимуществом данного сенсора является и наличие канала 6,9 ГГц, более подходящего для зондирования грунтов, чем каналы с $f > 10$ ГГц [23]. Поступление данных с канала 6,9 ГГц стало мощным стимулом для разработки усовершенствованных алгоритмов восстановления значений температуры и влажности грунтовых слоев [94, 112]. Для средних и низких широт с помощью разработанных алгоритмов достигнута удовлетворительная точность восстановления. Хорошо отлажена система заказа архивных и оперативных данных AMSR-E разной глубины обработки.

СВЧ радиометром, сконструированным в качестве преемника AMSR-E, является сенсор AMSR-2, запущенный 18 мая 2012 г. на борту ИСЗ GCOM-W. AMSR-2 обладает всеми преимуществами предшественника, но имеет улучшенное пространственное

разрешение (3x5 км для $f = 89$ ГГц) [45]. С весны 2013 г. некалиброванные и калиброванные данные доступны для широкого круга пользователей на бесплатной основе [93].

Таблица 2 – Характеристики современных многоканальных спутниковых СВЧ радиометров

ИСЗ	DMSP F-16 – F-19	JCOM-W	Aqua	Метеор-М №1, Метеор-М №2
Страна	США	Япония	США	Россия
Год запуска	2003 – 2014	2012	2002	2009, планир.(№2)
СВЧ радиометр	SSMIS	AMSR-2	AMSR-E	МТВЗА
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)

В исследованиях климата наиболее часто используются данные с СВЧ радиометров серии SSM/I-SSMIS, с 1987 г. устанавливаемых на ИСЗ программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program). Это обусловлено в первую очередь большой длиной временных рядов СВЧ измерений с этих сенсоров, позволяющей оценивать изменчивость параметров природных сред на материале больших выборок [134]. К недостаткам рассматриваемой аппаратуры относится ограниченный набор спектральных каналов, не включающий частоты ниже 18 ГГц, и меньшее пространственное разрешение по сравнению с AMSR-E и AMSR-2. Архивные и оперативные данные SSM/I-SSMIS находятся в свободном доступе на ресурсах Национального центра снега и льда NSIDC (National Snow and Ice Data Center) в университете Колорадо [115].

На орбите с 17 сентября 2009 года находится также российский ИСЗ, оснащенный мультиспектральным СВЧ радиометром – «Метеор-М» №1. Помимо СВЧ радиометра, он оборудован аппаратурой видимого и ИК диапазона (КМСС, МСУ-МР), бортовым радиолокатором БРЛК и гелиогеофизическим комплексом ГТАК-М. 26-канальный приемник микроволнового излучения МТВЗА используется для зондирования как

подстилающей поверхности, так и атмосферы. Данный СВЧ радиометр уступает зарубежным аналогам по пространственному разрешению на большинстве частот (от 9 км на частоте 183,3 ГГц до 50 км на частоте 18,7 ГГц). Слабая поляризационная развязка каналов V- и H-поляризации требует обязательного выполнения дополнительных процедур калибровки при обработке поступающих с ИСЗ данных [44], что не всегда возможно при оперативном мониторинге в региональном и глобальном масштабе силами пользователей аэрокосмической информации. Кроме того, к настоящему моменту не налажено оперативное архивирование и свободное распространение СВЧ данных с МТВЗА через интернет-сервисы, что существенно ограничивает круг пользователей данных.

По результатам анализа характеристик СВЧ радиометров и сопутствующей инфраструктуры пространственных данных в качестве основного инструмента для получения данных о мерзлых грунтах была выбрана пара СВЧ радиометров AMSR-2 / AMSR-E. Архивные данные с AMSR-E за 2002-2011 гг. позволяют тестировать разрабатываемый метод и его программно-алгоритмическое и методическое обеспечение с опорой на архивы контактных измерений за тот же период. Сенсор AMSR-2 (ИСЗ JCOM-W) выбран основным инструментальным средством для получения данных при использовании метода в режиме оперативной эксплуатации.

1.8 Выводы по разделу

В разделе рассмотрены теоретические основы мониторинга мерзлых грунтов Арктики с применением спутникового СВЧ радиометрического метода. Разъяснена базовая терминология междисциплинарного научного направления, посвященного исследованиям мерзлых грунтов дистанционными методами. Особое внимание уделено трактовкам терминов «Арктика», «многолетнемерзлый грунт», «деятельный слой» и т.п.

Приведена краткая характеристика СМГ и ММГ. Последовательно описаны основные параметры их состояния, электрические и радиофизические свойства, обозначены связи между отдельными параметрами состояния грунтов. Показано, что мерзлые грунты являются сложными многокомпонентными системами с существенной пространственной неоднородностью свойств.

Рассмотрены физические основы дистанционного пассивного микроволнового зондирования – СВЧ радиометрии. Проведен анализ опыта исследований грунтов Арктики средствами спутникового мультиспектрального СВЧ зондирования с момента

создания метода СВЧ радиометрии до настоящего времени. Историческая сводка содержит информацию о наиболее значимых достижениях отечественных и зарубежных научных коллективов в данном направлении.

Рассмотрены существующие системы мониторинга СМГ и ММГ, которые являются основными поставщиками информации о состоянии мерзлых грунтов Арктики: WMO, GTN-P, CALM. Показано, что из-за разреженности сетей стационарных наблюдений данные об изменчивости параметров мерзлых грунтов для значительных по площади территорий Арктики отсутствуют, а методы и средства спутникового СВЧ зондирования в упомянутых системах практически не используются. Сделан вывод, что созданная в 2009 г. система DUE Permafrost является единственным примером комплексного решения, ориентированного на широкое использование спутниковых данных для мониторинга мерзлых грунтов. Тем не менее, диагностические возможности метода спутниковой СВЧ радиометрии в ней реализованы не полностью.

На основе анализа свойств объекта мониторинга, возможностей метода спутниковой СВЧ радиометрии и характеристик существующих систем мониторинга СМГ и ММГ сформирован список требований к разрабатываемому методу оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по спутниковым СВЧ радиометрическим данным. В качестве инструментальных средств для получения первичных СВЧ данных выбраны спутниковые СВЧ радиометры AMSR-E и AMSR-2, обладающие наиболее подходящим для мониторинга грунтов набором спектральных каналов, пространственным разрешением, частотой съемки и суммарной длиной рядов измерений.

2 Разработка метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии

2.1 Исходные данные

Разработка метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным требует использования не только данных микроволнового диапазона, необходимых для оперативной эксплуатации метода, но и опорных данных наземных квазисинхронных наблюдений, выполняемых контактными методами, а также другой опорной информации из разных источников. Эта информация позволяет выполнить валидацию создаваемого программно-алгоритмического обеспечения и оценить применимость метода для решения задач мониторинга мерзлых грунтов Арктики.

В работе использованы следующие данные:

- 1) архивные и оперативные данные дистанционных измерений со спутникового СВЧ радиометра AMSR-E (ИСЗ Aqua),
- 2) опорные архивные данные дистанционных измерений со спутникового сенсора видимого и ИК диапазона (спектрорадиометра) MODIS (ИСЗ Aqua),
- 3) опорные архивные данные контактных измерений с площадок ГКС и ГМС,
- 4) опорная картографическая информация в виде тематических электронных карт и карт на бумажных носителях.

2.1.1 Спутниковые СВЧ радиометрические данные

Средством для получения исходной оперативной информации о состоянии мерзлых грунтов являются СВЧ радиометры AMSR-E и AMSR-2, характеристики которых были описаны в разделе 1.7. Калибровка выходных сигналов этих СВЧ радиометров осуществляется операторами ИСЗ в рамках реализуемых ими технологий первичной обработки спутниковой информации, но может быть выполнена и конечными пользователями с помощью открытых калибровочных данных. Пересчитанные в радиояркостные температуры отсчеты СВЧ сканеров, а также некалиброванные значения антенных температур предоставляются пользователям через интернет-сервисы. Для получения данных AMSR-2 используется система заказа СВЧ данных Японского аэрокосмического агентства JAXA “GCOM-W1 Data Providing Service” [93], для получения данных AMSR-E – портал Национального центра данных по снегу и льду (National

Snow and Ice Data Center – NSIDC) университета Колорадо [115]. Традиционно через интернет-сервисы распространяются спутниковые данные, относящиеся к нескольким категориям по глубине обработки, выполняемой оператором ИСЗ. В случае СВЧ радиометра AMSR-E для заказа доступны данные следующих уровней:

- 1) L1A – некалиброванные отсчеты антенных температур [92];
- 2) L2A – калиброванные отсчеты антенных температур, а также рассчитанные по ним значения РЯТ для мгновенных областей обзора сенсора в пределах полосы сканирования на восходящих и нисходящих витках ИСЗ, с параметрами калибровки и геопривязки;
- 3) L2B – значения параметров природных сред, восстановленные по данным уровня L2A, для мгновенных областей обзора сенсора в пределах полосы сканирования на восходящих и нисходящих витках ИСЗ, с параметрами калибровки и геопривязки.
- 4) L3 – приведенные к стандартным значениям пространственного разрешения и перепроецированные в одну из систем координат калиброванные значения РЯТ, а также восстановленные по ним значения параметров природных сред.

В настоящем разделе был проведен анализ данных уровней L2A и L3, оценена возможность их использования для решения задач оперативного мониторинга мерзлых грунтов. Выбор данных этих уровней обработки обусловлен высокой степенью готовности информации к оперативному анализу, исключающей дополнительные временные затраты пользователя на выполнение процедур калибровки и геопривязки. Основные особенности данных уровней L2A и L3 отражены в таблице 3. Примеры данных рассматриваемых двух уровней показаны на рисунке 1.

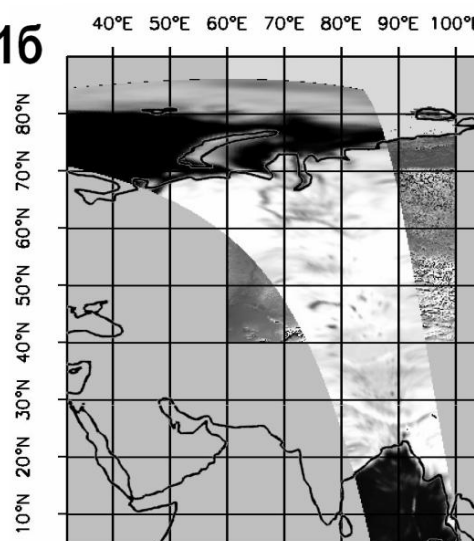
Все мультиспектральные данные L2A для конкретного витка (полуорбиты) ИСЗ содержатся в одном файле формата hdf, занимающем 58 МБ памяти ЗУ ПК. При анализе СВЧ данных по обширным районам, для покрытия которых съемкой необходимо несколько витков ИСЗ, построение мозаик из исходных данных сопряжено со значительными затратами вычислительных ресурсов. СВЧ данные уровня L3 распространяются в виде файлов, имеющих размер 1 МБ и содержащих мозаики ежедневного распределения РЯТ в пределах северного или южного полушария на конкретной частоте зондирования и поляризации сигнала. Их использование позволяет не включать в процесс обработки спутниковой информации дополнительные этапы сшивки изображений и приведения к выбранным значениям пространственного разрешения, необходимые в случае данных по полосам сканирования (L2A), и создает возможность для упрощения алгоритмов обработки данных. Кроме того, обработка СВЧ данных с ограниченного набора спектральных каналов в случае использования L3 требует меньших затрат вычислительных ресурсов по сравнению с L2B. Вышеперечисленные

преимущества послужили причиной ориентации разрабатываемого метода на использование СВЧ данных уровня L3. Однако стоит отметить и недостатки таких данных: зависимость качества восстановления значений параметров состояния мерзлых грунтов от качества калибровки и перепроецирования, проведенных оператором ИСЗ, невозможность апостериорной количественной оценки качества калибровки и геопривязки, коррелированность значений соседних пикселей, вызванная несоответствием пикселей мозаик мгновенным областям обзора сенсора.

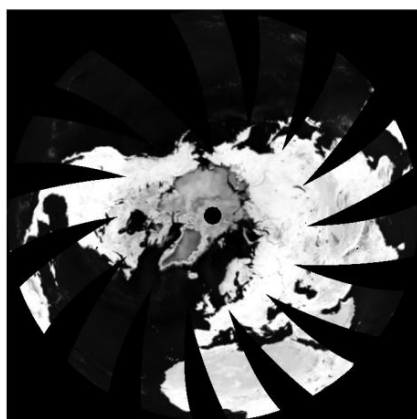
1a



1б



2a



2б

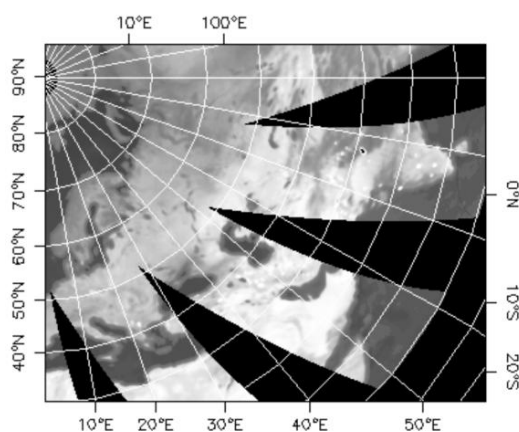


Рисунок 1 – Извлеченные из файлов данные AMSR-E уровня L2A (1) и L3 (2), отражающие пространственное распределение РТТ на $f = 6,9$ ГГц (H) для 13 июля 2007 г. Исходные данные представлены в виде мозаики отсчетов СВЧ радиометра для спутникового восходящего «витка» с усредненным разрешением 56 км (1a), мозаики распределения РТТ в северном полушарии в азимутальной проекции Ламберта с разрешением 25 км (2a).

Результаты геопривязки и перепроецирования исходных изображений – 1б и 2б

Таким образом, разрабатываемый метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов предполагает использование исходных данных СВЧ радиометра AMSR-E уровня L3 в виде ежедневных мозаик распределения РЯТ в пределах полушария в азимутальной проекции Ламберта с пространственным разрешением, приведенным к 25 км. При использовании данных с СВЧ радиометра AMSR-2 ведется обработка данных уровня L3, представленных в виде ежедневных мозаик распределения РЯТ в полярной стереографической проекции с разрешением 25 км. Данные проекции позволяют обеспечить минимальные геометрические искажения участков на территории Арктики при их отображении на плоскости (по сравнению, например, с глобальными цилиндрическими проекциями).

Таблица 3 – Характеристика архивных данных AMSR-E уровня L2A и L3, предоставляемых NSIDC на бесплатной основе

Данные	Проекция	Разрешение	Размер файла	Покрываемая поверхность данными из единичного файла	Спектральный диапазон, покрываемый данными из одного файла
L2A (swath)	Не определена	5,4 км (89 ГГц) – 56 км (6,9 ГГц)	58 МБ	Полоса шириной 1445 км от 89.24° с.ш. до 89.24° ю.ш. для одной полуорбиты ИСЗ	Все доступные спектральные каналы сенсора
L3 (EASE-grid)	Азимутальная Ламберта / глобальная цилиндрическая / четверть-градусная	25 км / 25 км / 0,25°	1 МБ / 1,6 МБ / 2 МБ	Полушарие / земной шар / земной шар	Один спектральный канал, одна поляризация

2.1.2 Данные со спутниковых средств видимого и ИК диапазонов

Спутниковые данные видимого и ИК диапазонов используются как опорная информация при решении на основе СВЧ радиометрических измерений таких задач, как определение начала вегетационного сезона, оценка пространственного распределения температур поверхности излучающих сред. В исследовании задействованы данные со спектрорадиометра MODIS, находящегося на борту ИСЗ Aqua. Несмотря на невысокое для оптического и теплового ИК диапазонов пространственное разрешение (250 м и более на пиксель), широкий набор спектральных каналов и размещение на той же платформе, что и AMSR-E, обусловили выбор указанного сенсора в качестве источника опорных данных. Каналом распространения архивных и оперативных данных является интернет-сервис NASA [113].

В исследовании используются спутниковые данные MODIS уровня обработки L3 с пространственным разрешением 1 км (представленные в синусоидальной проекции калиброванные отсчеты спектральной отражательной способности и яркостной температуры)

2.1.3 Данные контактных измерений

В качестве опорной информации о состоянии многослойных природных сред на территории Арктики в работе использованы данные контактных измерений с площадок 9 ГМС сети WMO и 3 ГКС сети CALM за 2003-2011 гг.

Данные с ГМС получены с помощью интернет-сервиса Национального центра климатических данных (National Climatic Data Center) «Global Summary of The Day» [114] и представлены в виде текстовых файлов, содержащих поля с ежедневными значениями следующих параметров:

- 1) Среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м $T_{возд}$, °Ф;
- 2) Среднесуточная точка росы, °Ф;
- 3) Среднесуточное атмосферное давление на уровне моря, мБар;
- 4) Среднесуточное атмосферное давление на уровне ГМС, мБар;
- 5) Среднесуточная видимость, миль;
- 6) Среднесуточная скорость ветра, узл.;
- 7) Максимальная скорость ветра, узл.;
- 8) Максимальная скорость порывов ветра, узл.;
- 9) Максимальная суточная температура, °Ф;
- 10) Минимальная суточная температура, °Ф;
- 11) Количество осадков, дм;
- 12) Высота снежного покрова H , дм;
- 13) Индикаторы погодных явления (туман/дымка, дождь/морось, снег/град, гроза, торнадо/шквал).

Данные с ГКС получены из интернет-архивов сети мониторинга деятельного слоя CALM [75]. Архивы представляют собой информационные блоки, помещенные в файлы форматов .xls и .txt. Структура архивов не унифицирована для всей сети стационаров. Это создает сложности при сведении информации из них в единую базу данных в ходе формирования локального архива опорных контактных измерений. Ряды контактных измерений с площадок ГКС, расположенных на российской территории, характеризуются наличием большого количества

пропусков. Доступны значения следующих параметров, измерения которых ведутся на стационарах:

- 1) среднесуточные и почасовые температуры грунта на разных глубинах (наборы глубин и интервалы между измерениями меняются от станции к станции);
- 2) среднесуточные и почасовые температуры приземного слоя воздуха;
- 3) влажность верхнего слоя грунта (несколько измерений в сезон);
- 4) ежегодные значения мощности СТС, измеренные мерзлотными щупами, мерзлотомерами и/или температурными логгерами.

Также в архивах находится информация о снежном и растительном покрове площадок.

2.1.4 Картографические данные

В работе использована следующая картографическая информация:

- 1) карта физико-географического районирования СССР из атласа 1983 г. [1];
- 2) карта физико-географического районирования по Л.С. Бергу [6];
- 3) карта растительности СССР из атласа 1983 г.;
- 4) глобальная карта земных покровов, составленная по данным спектрорадиометра MODIS в 2001 г. в Бостонском университете (Boston University) [97];
- 5) карта наземных экосистем Евразии 2000 г., созданная на материалах съемки SPOT4-VEGETATION в ИКИ РАН в сотрудничестве с Объединенным Исследовательским Центром Европейской Комиссии и ЦЭПЛ РАН [20];
- 6) карты почвенных характеристик из серии «Земельные ресурсы России» [128]
- 7) геокриологическая карта Арктики [74];
- 8) топографические карты СССР (листы Q-4142, R-4142, R-4344, R-5758, S-4142, S-4344);
- 9) цифровые модели рельефа SRTM30 [131].

Опорные картографические данные, представленные в цифровом виде, были перепроецированы (конечная проекция – азимутальная равноплощадная Ламберта). Карты на бумажных носителях были отсканированы, геопривязаны и перепроецированы.

2.2 Выбор тестовых полигонных участков в «ключевых» для мониторинга состояния мерзлых грунтов Арктики районах

2.2.1 Северо-восток Европейской территории России, север Западной Сибири и северо-восток Восточной Сибири как «ключевые» районы евразийского сектора Арктики

Несмотря на то, что разработка метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов производится с ориентацией на его использование на всей территории Арктики, отдельные районы Арктики требуют первоочередного внимания при мониторинге мерзлых грунтов. К таким «ключевым» районам относятся территории, состояние ММГ в которых является отражением региональных и глобальных тенденций климатических изменений. В соответствии с работами В.В. Мелентьева, Ю.А. Израэля [18, 103, 108] в качестве «ключевых» районов для мониторинга мерзлых грунтов в евразийском секторе Арктики выбраны северо-восток ЕТР, север ЗС, где грунты наиболее чувствительны к изменениям климата, и северо-восток ВС с наименьшей чувствительностью грунтов к климатическим изменениям. При этом, согласно развиваемой методологии, основную информацию о пространственно-временной изменчивости состояния грунтов в этих районах можно получить в ходе комплексного анализа СВЧ радиометрических данных для территорий вдоль характеристических трансектов, пересекающих исследуемые районы. Данные для двух таких тестовых трансектов проанализированы в настоящей работе.

2.2.2 Тестовые трансекты

Характеристические трансекты Т1 и Т2 шириной 25 км, равной стороне одного элемента разрешения мозаики РЯТ на местности, пересекают территорию ЗС и ВС соответственно и по долготному положению совпадают с меридианами 70° в.д. и 130° в.д.. Северная граница трансектов установлена на широте 80° с.ш., соответствующей точкам в акватории Карского моря (Т1) и моря Лаптевых (Т2). Сделано это с целью получения попутных отсчетов РЯТ поверхности океана, более стабильной по сравнению с РЯТ участков суши Арктики и играющей роль репера при оценке их излучательной способности (см. раздел 4). Южная граница трансектов не совпадает с Северный Полярным кругом, а установлена на широте 50° с.ш. Это позволяет оценить излучательные свойства природных сред в разных широтных зонах и исследовать изменчивость состояния мерзлых грунтов в контексте более обширных

географических областей. Также это обусловлено необходимостью испытания разрабатываемого метода оценки изменчивости состояния грунтов за пределами Арктики, что дает возможность определить пространственные границы его применимости.

Сухопутная часть трансекта Т1 относится к Западно-Сибирской физико-географической стране и характеризуется классически выраженной широтной зональностью, обусловленной особенностями рельефных и климатических условий. По сравнению со всеми другими районами евразийского сектора Арктики арктическая полоса ЗС (Ямало-Гыданская область) обладает наибольшей протяженностью с севера на юг [68].

Теплые воды из Баренцева моря, поступающие в виде небольших ветвей в Карское море через пролив Карские Ворота, достигают западного побережья п-ова Ямал, образуя Ямальское течение. Восточная часть п-ова омывается теплыми водами, выносимыми в акваторию Карского моря р. Обью. Это обуславливает более раннее вскрытие ото льда этих участков Карского моря весной-летом и быстрое ледообразование в осенне-зимний период, создает приток тепла в прибрежные районы, что является важным климатообразующим фактором региона. Существенное влияние на климат севера ЗС оказывают особенности атмосферной циркуляции: интенсивная циклоническая активность в зимний период, вызванная взаимодействием исландского минимума и сибирского антициклона, и муссонный характер движения воздушных масс – в летний [68]. Равнинность территорий облегчает проникновение в летний период холодных воздушных масс вглубь континента. Климат севера ЗС занимает промежуточное положение между морским и континентальным. По направлению к югу климатические условия вдоль трансекта Т1 становятся максимально приближенными к континентальным.

Область распространения ММГ на долготе меридиана трансекта Т1 простирается на юг до 60° с.ш. (см. рисунок 2). Южнее этой границы наблюдается только сезонное промерзание грунтовых слоев. Мощность толщ ММГ варьируется от 2-5 м до 300-400 м, температура – от -1°С (в речных долинах на юге области распространения ММГ) до -9°С (на водоразделах в северной части п-ова Ямал) [16, 68]. Мощность деятельного слоя изменяется от 0,2 м (север области) до 2 м (юг) [75]. Многолетнемерзлые грунты ЗС характеризуются повышенной льдистостью (до 30-50% в верхних слоях мерзлых толщ) и засоленностью. Засоленность обуславливает уменьшение температуры замерзания грунтов, что даже при достаточно низких значениях среднегодовой температуры и высокой льдистости делает ММГ рассматриваемой области более чувствительными к изменениям климата [16, 18].

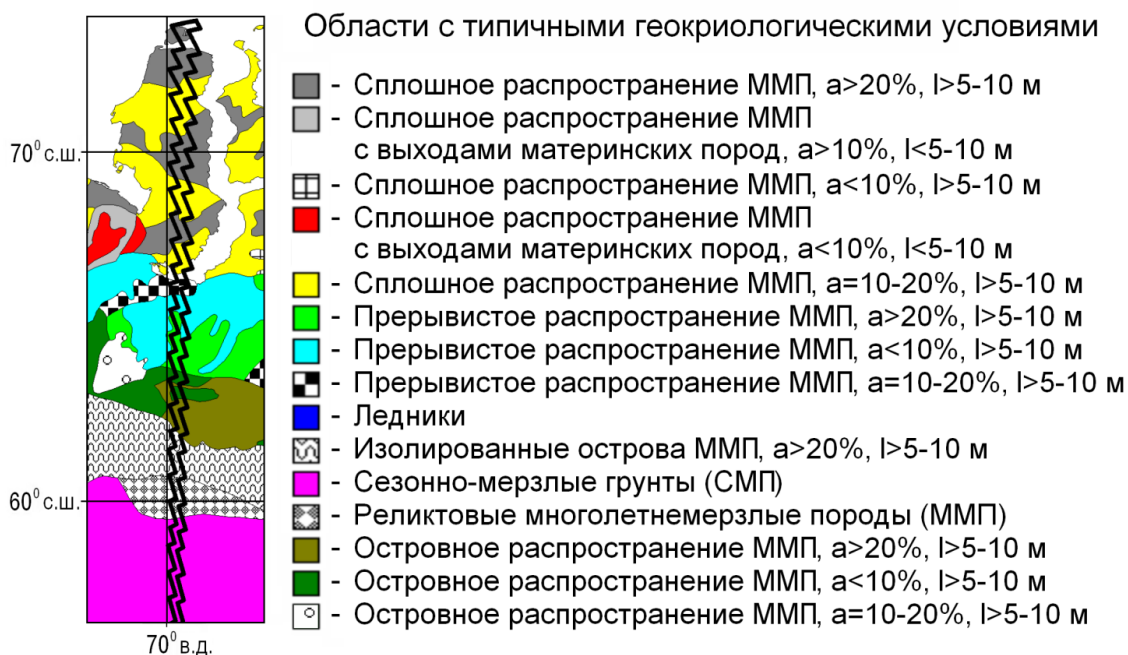


Рисунок 2 – Схема распространения ММП и СМГ в ЗС вдоль трансекта 70° в.д. (по [74]). a – суммарная льдистость мерзлых толщ в слое 10 м от поверхности грунта, % по объему, l – толщина слоя осадочных перекрывающих пород. Черным выделена граница тестового трансекта

Благодаря этой чувствительности север ЗС является одним из «ключевых» районов при анализе изменений в климатической системе в целом. На выбор территории вдоль характеристического трансекта 70° в.д. в качестве области для тестовых испытаний разрабатываемого метода повлияла и существенная неоднородность климатических, ландшафтных и геокриологических условий региона в меридиональном направлении. Кроме того, изменчивость состояния ММП и СМГ территорий вдоль трансекта 70° в.д. была исследована ранее профессором В.В. Мелентьевым с соавторами на материале архива данных СВЧ радиометров серий SSM/I и SMMR за 1978-1999 гг., имевших меньшее пространственное разрешение по сравнению с AMSR-E и AMSR-2 [108].

Территории вдоль меридионального трансекта Т2, пересекающего ВС, характеризуются резко континентальным климатом. Он обусловлен удаленностью данного «ключевого» района от Атлантического океана, являющегося основным источником влажных воздушных масс на севере Евразии. Поступление влажного воздуха с Тихого океана ограничено особенностями рельефа ВС и Дальнего Востока и преобладанием ветров северных и западных направлений. Антициклонические условия доминируют на территории ВС значительную часть года [3].

Трансект Т2 почти полностью лежит в области непрерывного распространения ММП (рисунок 3). Многолетнемерзлые породы являются причиной пониженных температур воды в реках и озерах рассматриваемого региона, а также особого гидрологического режима

водотоков. Данные территории характеризуются активным протеканием криогенных процессов, вызывающие появление речных и грунтовых наледей, бугров пучения и т.п. внешних признаков существования ММГ. Отмечается существенная расчлененность ландшафтов и значительные перепады высот в противоположность Западно-Сибирской низменности [12]. Многолетнемерзлые толщи ВС во многих случаях имеют меньшую льдистость по сравнению с западносибирскими (в основном это справедливо для горных районов [74]). Им свойственна также малая минерализация поровых растворов. Наибольшая зафиксированная мощность толщ ММГ в ВС превышает 1000-1400 м [12]. Температура ММГ меняется от $-0,5^{\circ}\text{C}$ в долинах рек на юге региона до -14°C на водоразделах в северной его части. Мощность деятельного слоя на севере составляет 0,2-1,5 м и достигает 5-6 м в южной части трансекта Т2.

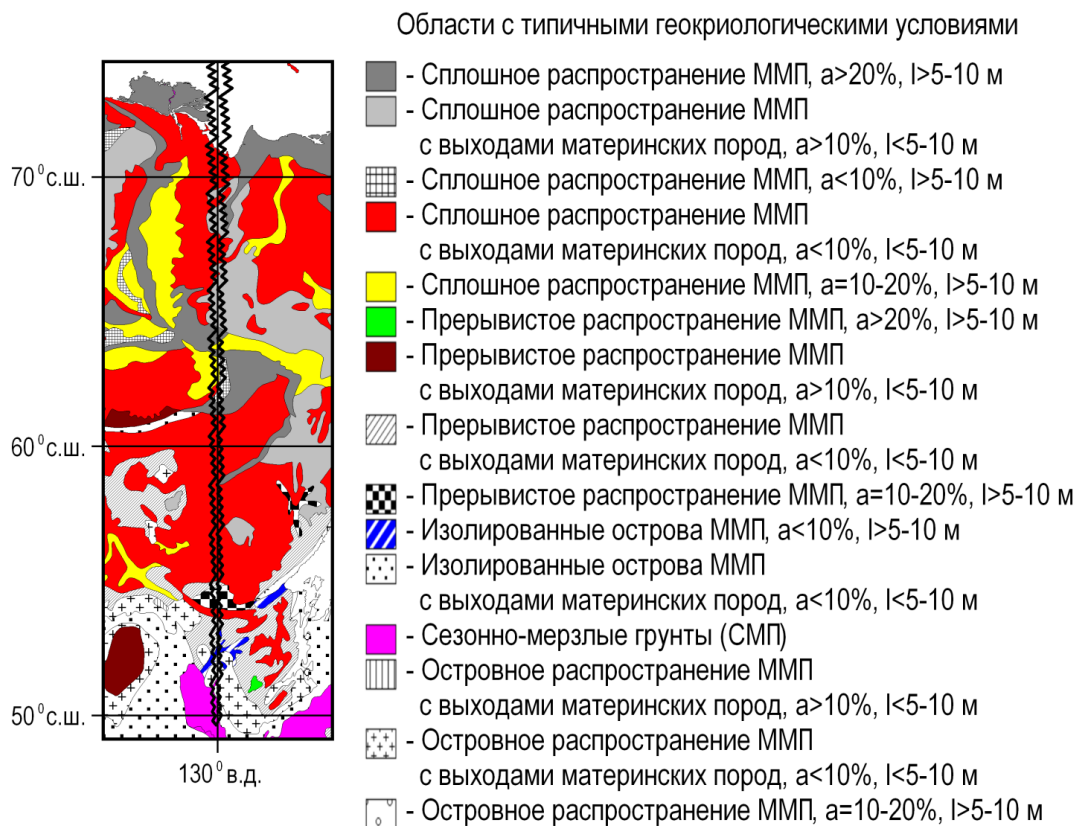


Рисунок 3 – Схема распространения ММГ и СМГ в ВС вдоль трансекта 130° в.д. (по [74]). a – суммарная льдистость мерзлых толщ в слое 10 м от поверхности грунта, % по объему, l – толщина слоя осадочных перекрывающих пород. Черным выделена граница тестового трансекта

Физико-географическое районирование «ключевых» районов вдоль трансектов Т1 и Т2 существенно различается и является выражением естественно-исторического членения территорий исходя из совокупности климатических, рельефных, биогеографических условий. Согласно Л.С. Бергу, понятие «физико-географическая зона» может получать различное содержание в зависимости от выбранного принципа выделения зон [6]. В настоящей работе под

физико-географической зоной подразумевается прежде всего выделяемая по особенностям ландшафтных условий географическая область.

Для ЗС характерна традиционная широтно-зональная структура ландшафтных областей (рисунок 4). Это связано в первую очередь с низменным, малорасчлененным рельефом и отсутствием крупных внутриконтинентальных водоемов в непосредственной близости от трансекта Т1. Напротив, в Т2 проявляется не только широтная зональность, но и высотная поясность. Особняком стоят таежные и тундрово-таежные горные области, обладающие специфическими геоморфологическими, гидрогеологическими, климатическими, и, как следствие, ландшафтными условиями.

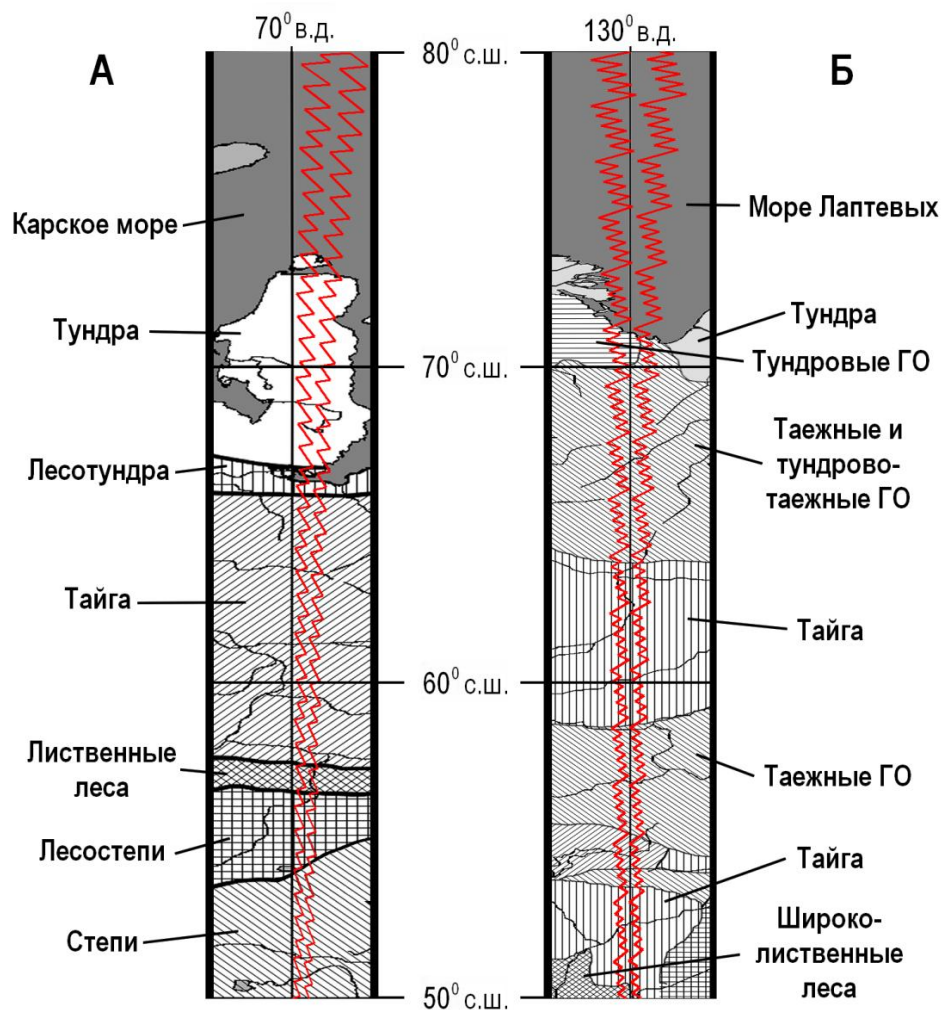


Рисунок 4 – Физико-географическое районирование ЗС вдоль трансекта 70° в.д. (А) и ВС вдоль трансекта 130° в.д. (Б) (по [1]). Красным выделены границы исследуемых областей. ГО – горные области

При изучении карты экосистем, составленной в ЦЭПЛ РАН [20], обнаружено, что для территории вдоль трансекта Т1 наблюдается достаточно четкое соответствие между ландшафтными зонами и преобладающими типами экосистем в их пределах (рисунки 4 и 5).

Для ВС это соответствие не столь очевидно, во многом из-за более размытых границ между областями с разными доминирующими растительными комплексами (особенно в южной части трансекта Т2). Стоит отметить преобладание вечнозеленых хвойных пород в таежной зоне ЗС и листопадных хвойных пород – в той же ландшафтной зоне ВС. Высокая заболоченность территорий вдоль трансекта Т1 выражается на карте экосистем в большой площади, занимаемой водно-болотными комплексами, существенно превышающей аналогичный показатель для ВС.

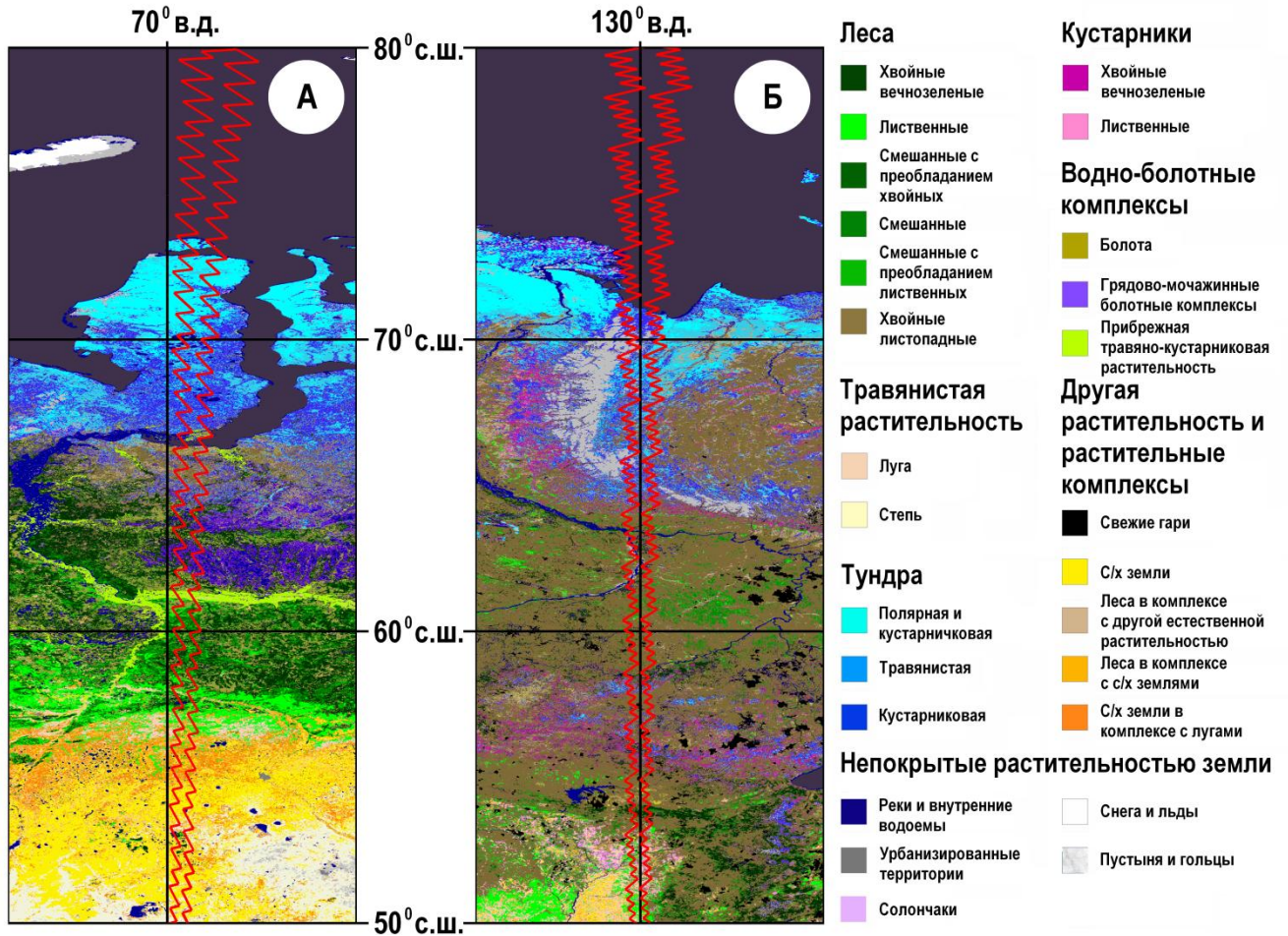


Рисунок 5 – Фрагменты карты земных покровов для областей вдоль трансекта 70° в.д. (А) и трансекта 130° в.д. (Б) (ГИС Terra Norte, [20]). Красным выделены границы исследуемых областей

Вышеперечисленные различия позволяют рассматривать территории вдоль трансектов Т1 и Т2 как контрастные по отношению друг к другу по особенностям рельефа, геокриологическим и климатическим условиям.

2.2.3 Полигонные тестовые участки

Необходимость проведения комплексного анализа данных спутниковых и наземных наблюдений, валидации разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики в рассмотренных обширных «ключевых» районах требует выделения в их пределах тестовых участков, для которых доступен максимальный объем априорной информации о грунтах и граничащих с ними природных средах. Поэтому было принято решение выбрать в качестве таких участков «пиксели» мозаик РЯТ, расположенные вблизи немногочисленных действующих в Арктике ГКС и ГМС. Было выбрано по одному участку размером 25 * 25 км в каждом из трех «ключевых» районов.

Расположение тундровых участков приведено на рисунках 6 и 7. Выбор указанных участков сделан на основе следующих требований: максимального расстояния от береговых линий морей и внутриконтинентальных водоемов, минимальной доли водных объектов в пределах участка, максимальной близости к ГМС и ГКС, максимальной репрезентативности ландшафтных, гидрологических и климатических условий по отношению к окружающим территориям. Было сделано допущение, что вследствие крайней неоднородности свойств природных многослойных сред Арктики контактные измерения, осуществляемые как на некоторой площадке вблизи конкретного элемента разрешения на местности, так и в его пределах, могут давать достоверную информацию о состоянии грунтов на его территории. Описание ГМС и ГКС приведено соответственно в таблицах 4 и 5. Фотографии площадок ГКС сети CALM показаны на рисунке 8.

Растительный покров участков У1, У2 и У3 различается достаточно существенно (см. таблицу 6 и рисунок 9). В пределах У1 доминирует полярная кустарничковая тундра, в У2 – кустарниковая и травяная тундра. У3 по доле площади, занимаемой древесной растительностью, можно отнести к лесотундре. В целом, выбор тестовых участков позволяет охватить основные комбинации растительных сообществ, характерные для Арктики.

Таблица 4 – Характеристика ГМС Марре-Сале, Воркута и Черский, расположенных вблизи тестовых участков (соответственно У1, У2 и У3)

Код AWS		230320	232260	251230
Название ГМС		Марре-Сале	Воркута	Черский
Географическое положение	Широта	69,72° с.ш.	67,48° с.ш.	68,75° с.ш.
	Долгота	66,8° в.д.	64,02° в.д.	161,28° в.д.
Высота над уровнем моря, м		25	172	28
Год начала наблюдений		1934	1953	1955

Таблица 5 – Характеристика площадок ГКС Марре-Сале, Аяч-Яга и Родинка

Код площадки CALM		R3	R2	R18
Название стационара		Марре-Сале	Аяч-Яга	Родинка
Географическое положение	Широта	69° 43' с.ш.	67° 35' с.ш.	68° 45' с.ш.
	Долгота	66° 51' в.д.	64° 11' в.д.	161° 30' в.д.
Высота над уровнем моря, м		18	148	152
Уклон (<i>aspect</i>)		~0° (до 10°)	~3°	2-3°
Экспозиция склонов		-	южная / юго-западная	западная / юго-западная
Доминирующий ландшафтный комплекс		полигональная тундра	пятнистая тундра	граница лесотундры и альпийской тундры
Грунт		песок, глина (глеизем, есть заторфованные участки)	суглинок, засоленный, заторфованный, с прослойкой торфа толщиной около 12 см	супесь, засоленная, с малым количеством детрита (заторфованный глеизем, оглеенный криозем)
Растительность		мохово-лишайниково-травяная тундра с песчаными раздувами, фрагментами кустарничковой и осоковой тундры	кустарничково-моховая тундра	кустарничково-мохово-лишайниково-травяная тундра с единичными деревьями (лиственница)
Год начала измерений T_{sp}		1996	1999	2004

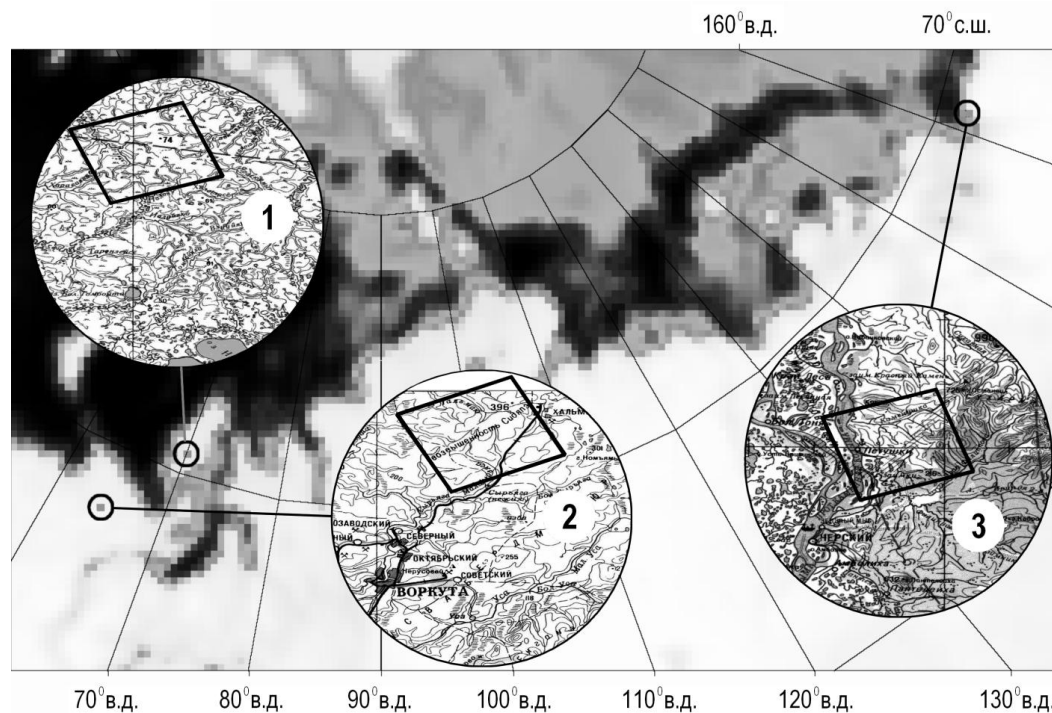


Рисунок 6 – Географическое положение тундровых тестовых участков: 1 – У1, 2 – У2, 3 – У3

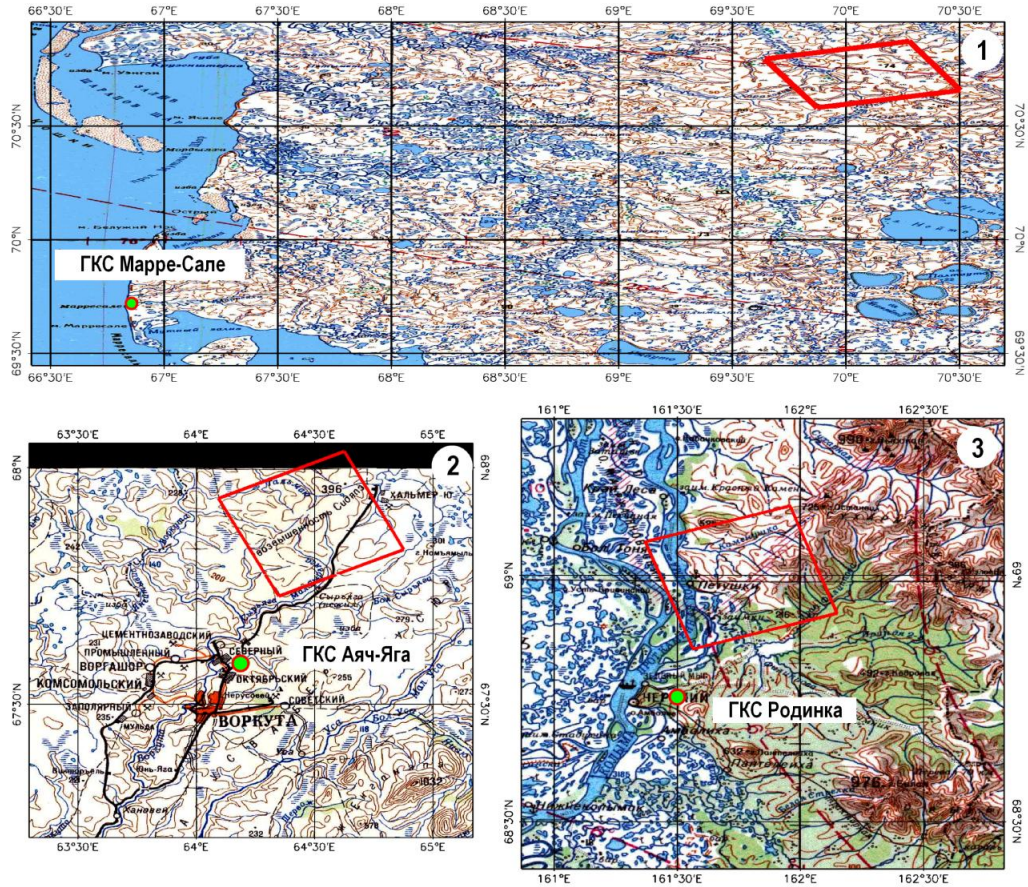


Рисунок 7 – Взаимное расположение площадок ГКС Марре-Сале (1), Аяч-Яга (2) и г. Родинка (3) и тестовых тундровых участков У1, У2 и У3 (границы участков обозначены красными контурами)



Рисунок 8 – Общий вид площадок геокриологических стационаров (фото CALM). 1 – ГКС Марре-Сале, 2 – ГКС Аяч-Яга, 3 – ГКС Родинка

Таблица 6 – Процентное соотношение площадей, занимаемых разными типами растительного покрова в пределах тестовых участков У1, У2, У3 (согласно [20])

Участок	У1 (Ямал)	У2 (Воркута)	У3 (Родинка)
Состав растительного покрова	94% - полярная кустарничковая тундра, 6% - травянистая (осоковая) тундра	7% - болота, 23% - травянистая (осоковая) тундра, 70% - кустарниковая тундра	20% - хвойные листопадные леса, 1% - болота, 7% - грядово-мочажинные болотные комплексы, 1% - полярная кустарничковая тундра, 27% - травянистая (осоковая) тундра, 21% - кустарниковая тундра, 4% - леса в комплексе с другими типами растительности, 1% - гольцы, 18% - водные объекты

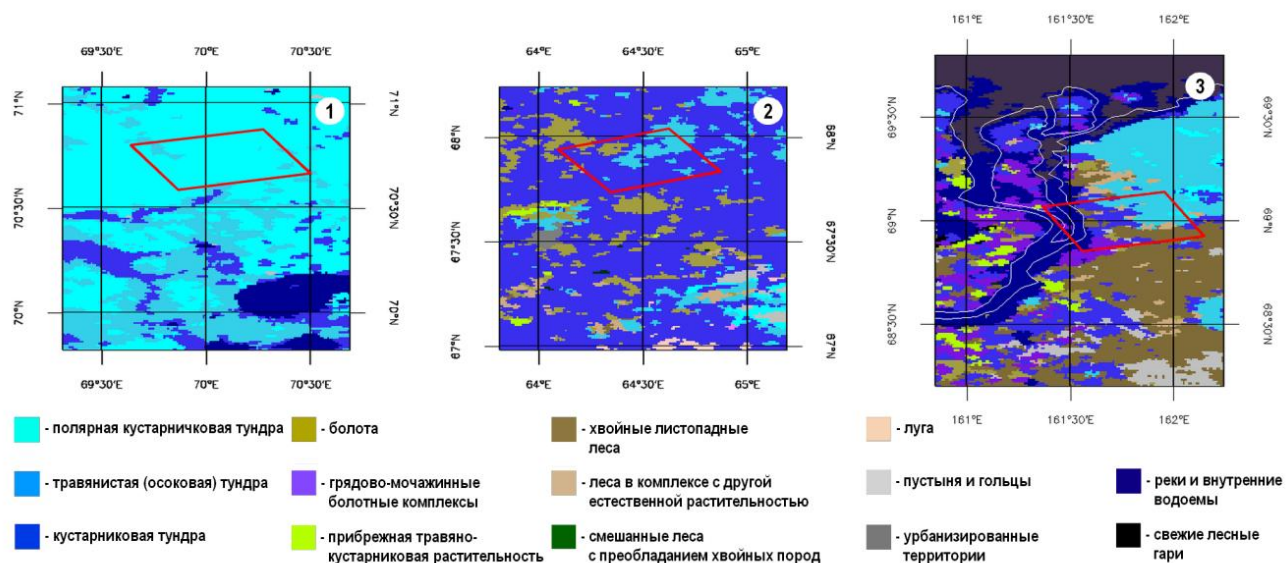


Рисунок 9 – Карты растительности тестовых тундровых участков У1 (1), У2 (2) и У3 (3) (выдержка из [20])

2.3 Выбор индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов и подходов к определению их значений на основе комплексного анализа данных спутниковых СВЧ радиометрических и наземных контактных измерений

2.3.1 Выбор индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов

Для разработки метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по спутниковым СВЧ радиометрическим данным, удовлетворяющего предъявляемым к нему требованиям (см. раздел 1.6), необходима максимально полная информация об изменчивости как интегральных характеристик СВЧ излучения подстилающей поверхности, фиксируемых в ходе дистанционного зондирования (РЯТ), так и основных параметров состояния грунтов (T_{sp} , $T_{возд}$, высоты снежного покрова и т.д.), в разных районах Арктики. Наиболее важной задачей при этом можно считать выявление особенностей пространственно-временной изменчивости РЯТ и оценку связи изменений РЯТ с вариациями параметров состояния сред. Для решения данной задачи был проведен комплексный анализ временных рядов спутниковых СВЧ радиометрических измерений для тестовых тундровых участков У1, У2, У3, выбор которых обоснован в разделе 2.2, и рядов контактных измерений с ближайших к участкам ГКС и ГМС. Изменчивость проанализирована на материале комбинированного архива данных за 2005-2008 гг., сформированного путем ассимиляции разнородных данных из нескольких источников

(см. раздел 2.1). Причиной выбора указанного временного промежутка является наличие в нем контрастирующих друг с другом по суровости зимних сезонов лет: 2006 г. с холодной зимой и 2007 г. с теплой зимой (согласно отчету Росгидромета о климате на территории РФ [15]).

Сформированный архив данных содержит среднесуточные значения следующих параметров многослойных сред и метеопараметров: температура поверхностного слоя грунта на глубине 2 см (T_{cp}), температура приземного воздуха на высоте 2 м ($T_{возд}$), высота снежного покрова (H), тип осадков (F), радиояркие температуры тестового участка на $f = 6,9$ ГГц и $f = 36,5$ ГГц с V- и H-поляризацией сигнала ($T_{я}$). В архив также вошли данные о влажности поверхностного слоя грунта W (несколько отсчетов в год).

Выбор $f = 6,9$ ГГц и $f = 36,5$ ГГц из перечня спектральных каналов СВЧ радиометров AMSR-E и AMSR-2 сделан по следующим причинам:

- 1) стремление снизить объем обрабатываемых данных и ориентация разрабатываемого метода на максимально эффективное использование малого количества частот;
- 2) сходство характера временной изменчивости РЯТ на частотах, лежащих по одну сторону от максимума мнимой части КДП грунтовой влаги (расположенного для свободной воды на f около 20 ГГц) – рисунок 10;
- 3) частота 6,9 ГГц среди частот СВЧ радиометров AMSR-E и AMSR-2 является оптимальной для мониторинга грунтов (см. разделы 1.6, 1.7), на $f = 36,5$ ГГц согласно [94] в отдельных ландшафтных зонах наблюдается наибольшая корреляция между РЯТ и T_{cp} , и излучение земной поверхности на $f = 36,5$ ГГц меньше подвержено влиянию атмосферы по сравнению с $f = 89$ ГГц.

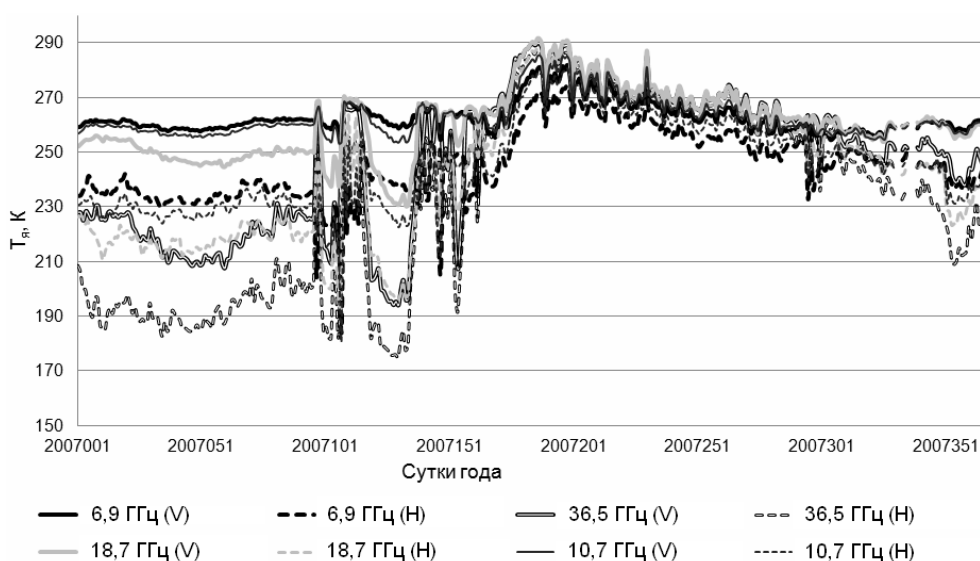


Рисунок 10 – Внутригодовая изменчивость $T_{я}$ для тестового участка У2 в 2007 г. ($f = 6,9, 10,7, 18,7, 36,5$ ГГц, V- и H-поляризация)

В первую очередь была произведена оценка частот проявления значений $T_{я}$, $T_{зр}$, $T_{возд}$ с помощью гистограмм. Как видно из рисунка 11, на $f = 36,5$ ГГц распределение частот РЯТ имеет бимодальный характер. Для РЯТ на $f = 6,9$ ГГц, $T_{зр}$, $T_{возд}$ гистограммы более приближены к характерным для нормального и логнормального распределения унимодальным. Для участков У1 и У2 при Н-поляризации сигнала на $f = 6,9$ ГГц фиксируется несколько экстремально низких значений РЯТ, существенно изменяющих ширину гистограммы. Для участка У3 такие значения не наблюдаются.

Были рассчитаны статистические характеристики временных рядов $T_{я}$, $T_{зр}$, $T_{возд}$: математическое ожидание M , стандартное отклонение σ , эксцесс δ . В качестве примера в таблице 7 приведены результаты расчетов по данным измерений для участков У1, У2, У3 в 2007 г. Согласно полученным значениям σ и δ , распределение для РЯТ при $f = 36,5$ ГГц существенно отличается от нормального, что подтверждает выводы, сделанные по гистограммам.

Таблица 7 – Статистические характеристики рядов дистанционных и контактных измерений для участков У1 (Ямал), У2 (Воркута), У3 (Колыма) в 2007 г.

Ряд значений	Характеристика временного ряда		
	M, K	σ, K	δ
Участок У1 (Ямал)			
$T_{возд}$	268,9	12,0	0,20
$T_{зр}$	270,0	9,6	-0,83
$T_{я}, f = 6,9$ ГГц (V)	259,1	5,7	0,03
$T_{я}, f = 6,9$ ГГц (H)	236,6	12,4	2,47
$T_{я}, f = 36,5$ ГГц (V)	245,9	23,4	-1,50
$T_{я}, f = 36,5$ ГГц (H)	230,1	32,8	-1,61
Участок У2 (Воркута)			
$T_{возд}$	270,4	12,5	-0,11
$T_{зр}$	274,7	5,5	1,26
$T_{я}, f = 6,9$ ГГц (V)	262,7	5,6	1,81
$T_{я}, f = 6,9$ ГГц (H)	245,4	12,8	0,97
$T_{я}, f = 36,5$ ГГц (V)	247,7	25,3	-1,11
$T_{я}, f = 36,5$ ГГц (H)	233,6	34,3	-1,47
Участок У3 (Колыма)			
$T_{возд}$	265,4	18,2	-1,26
$T_{зр}$	272,4	7,6	-1,00
$T_{я}, f = 6,9$ ГГц (V)	259,2	10,5	-0,99
$T_{я}, f = 6,9$ ГГц (H)	247,3	14,0	-1,22
$T_{я}, f = 36,5$ ГГц (V)	240,9	33,4	-1,59
$T_{я}, f = 36,5$ ГГц (H)	233,9	37,6	-1,62

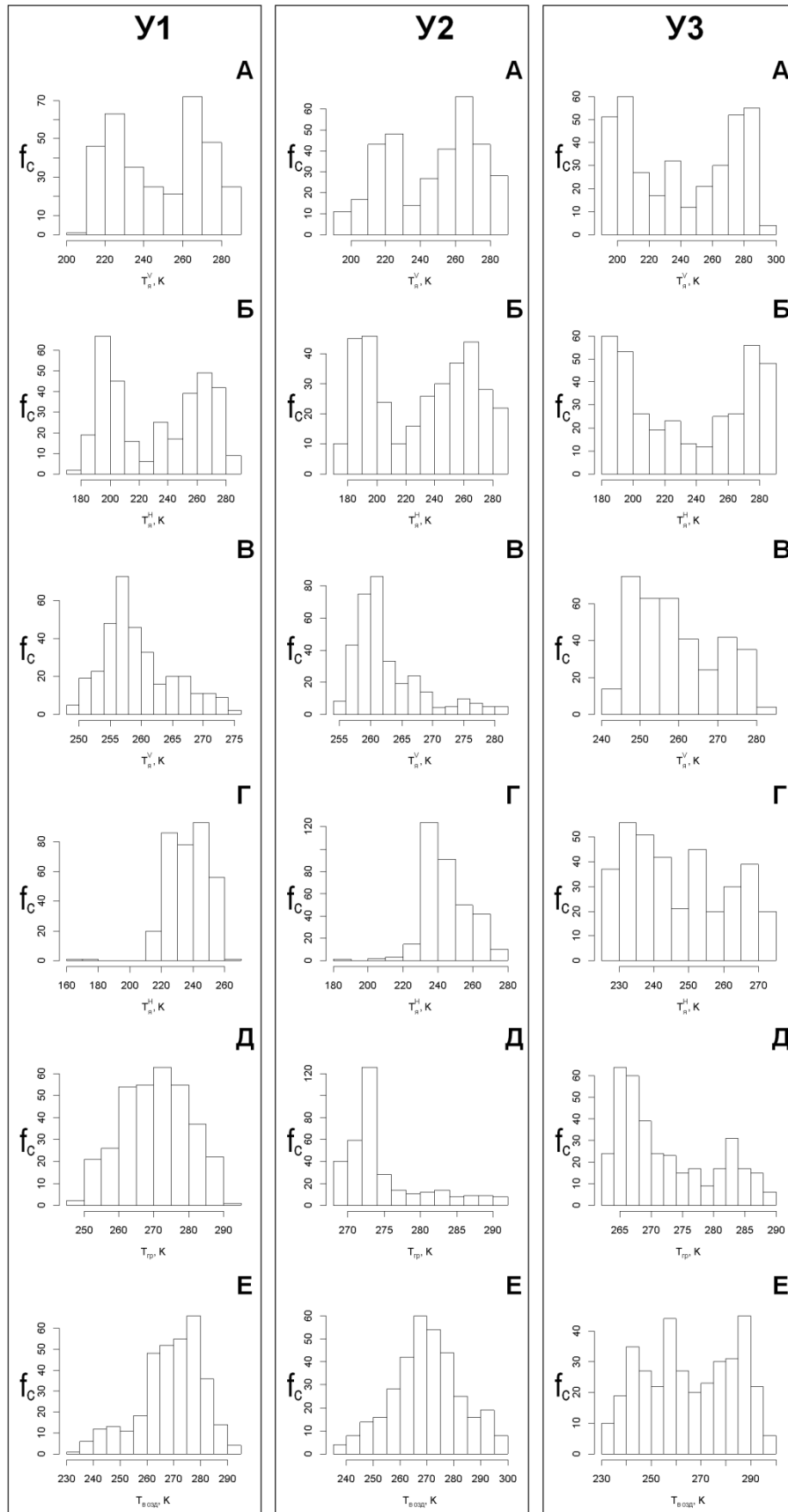


Рисунок 11 – Гистограммы $T_{я}$, $T_{сп}$ и $T_{возд}$ для тестовых участков У1, У2, У3 для 2007 г. (А – $T_{я}$ при $f = 36,5$ ГГц, V-поляризации, Б – $T_{я}$ при $f = 36,5$ ГГц, H-поляризации, В – $T_{я}$ при $f = 6,9$ ГГц, V-поляризации, Г – $T_{я}$ при $f = 6,9$ ГГц, H-поляризации, Д – $T_{сп}$, Е – $T_{возд}$); f_c – частота проявления значений

Анализ диаграмм рассеяния для пар среднесуточных значений $T_{я}$, T_{cp} , $T_{возд}$ (пример – рисунки 12-15) показал, что в большинстве случаев связь между параметрами $T_{я}$ (V-поляризация) и T_{cp} близка к линейной. В то же время точки, представляющих пары значений $T_{я}$ и T_{cp} на плоскости $T_{cp} - T_{я}$, в интервале $T_{cp} = 265-280$ К весьма далеко расположены от прямых, аппроксимирующих зависимость этих величин. В области малых значений T_{cp} (< 265 К) прослеживается более тесная связь этого параметра с РЯТ на $f = 6,9$ ГГц, а в области больших значений (> 280 К) – с РЯТ на $f = 36,5$ ГГц. Описание связи между $T_{я}$ ($f = 36,5$ ГГц, V) и T_{cp} внутри годового цикла с помощью одной прямой затруднено, но может быть выполнено с использованием других функций (например, полиномов 2-ого порядка). На $f = 6,9$ ГГц связь может быть удовлетворительно описана прямой, несмотря на большие средние отклонения точек $T_{cp} - T_{я}$ от нее. При этом основной проблемой является установление соответствия между РЯТ и T_{cp} для диапазона $T_{cp} = 265-280$ К. С ее решением связано обеспечение точности восстановления значений T_{cp} по РЯТ с помощью регрессионных моделей.

Для количественной оценки согласованности изменения во времени РЯТ, T_{cp} и $T_{возд}$ были рассчитаны выборочные коэффициенты корреляции r (таблица 8). Наибольшие значения принимает r между РЯТ (6,9 ГГц, V) и T_{cp} для участка У3 ($r > 0,9$). РЯТ на $f = 36,5$ ГГц коррелирует с T_{cp} в меньшей степени. Для участков У1 и У2 прослеживается обратная ситуация: r больше между T_{cp} и РЯТ на $f = 36,5$ ГГц, чем между T_{cp} и РЯТ на $f = 6,9$ ГГц. Причина различий в поведении r была выяснена путем анализа диаграмм рассеяния. Для участка У3 наблюдается зависимость между T_{cp} и РЯТ на $f = 36,5$ ГГц, которая с трудом может быть аппроксимирована одной прямой (имеется четко выраженная точка перегиба). Для пары параметров T_{cp} и РЯТ (6,9 ГГц, V) линейная аппроксимация, напротив, дает хорошие результаты. В случае участков У1 и У2 суммарное отклонение точек от аппроксимирующей прямой больше в случае с РЯТ на $f = 6,9$ ГГц. Для поиска причины появления этих отклонений был произведен анализ годового хода параметров среды.

Была рассмотрена внутригодовая изменчивость $T_{я}$, T_{cp} , $T_{возд}$ и погодных явлений для трех тестовых участков в 2005-2008 г. Временной ход рассматриваемых параметров для участков У1 и У3, для которых обнаружены наибольшие различия коэффициентов корреляции между РЯТ на разных частотах и T_{cp} , показан на рисунках 16 и 17.

В первую очередь было отмечено, что кривая годового хода РЯТ (зависимость радиояркой температуры от номера суток в году) для всех тестовых участков может быть разбита на четыре характерных временных периода, обозначенных автором латинскими буквами А, В, С, D и не совпадающих с традиционно выделяемыми сезонами. Каждый из этих периодов отличается от других по средним значениям РЯТ и их СКО (это отражено в таблице 9).

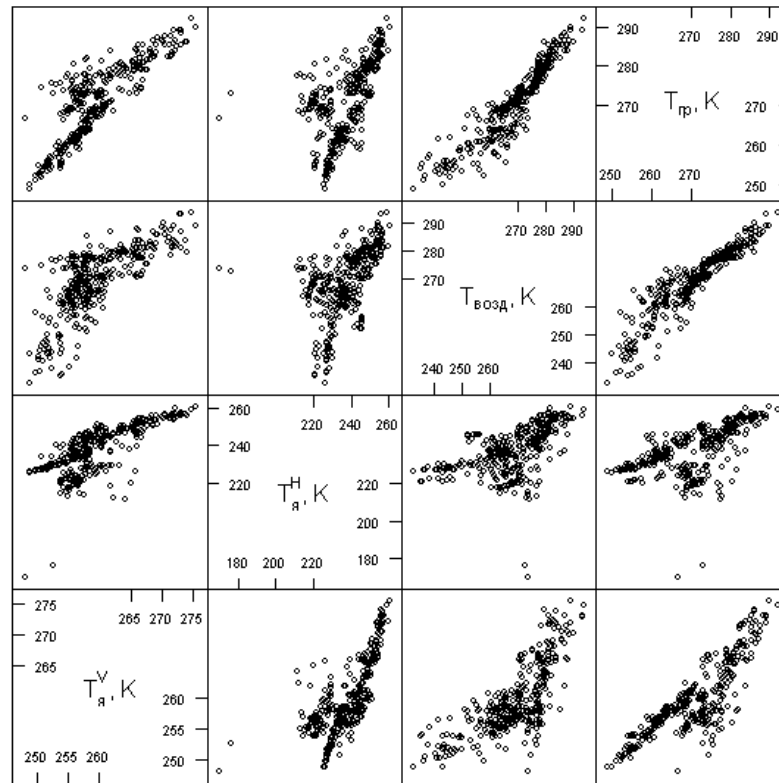


Рисунок 12 – Диаграммы рассеяния в координатах $T_{я}$ ($f = 6,9$ ГГц), $T_{гр}$, $T_{возд}$ для участка У1 в 2007 г.

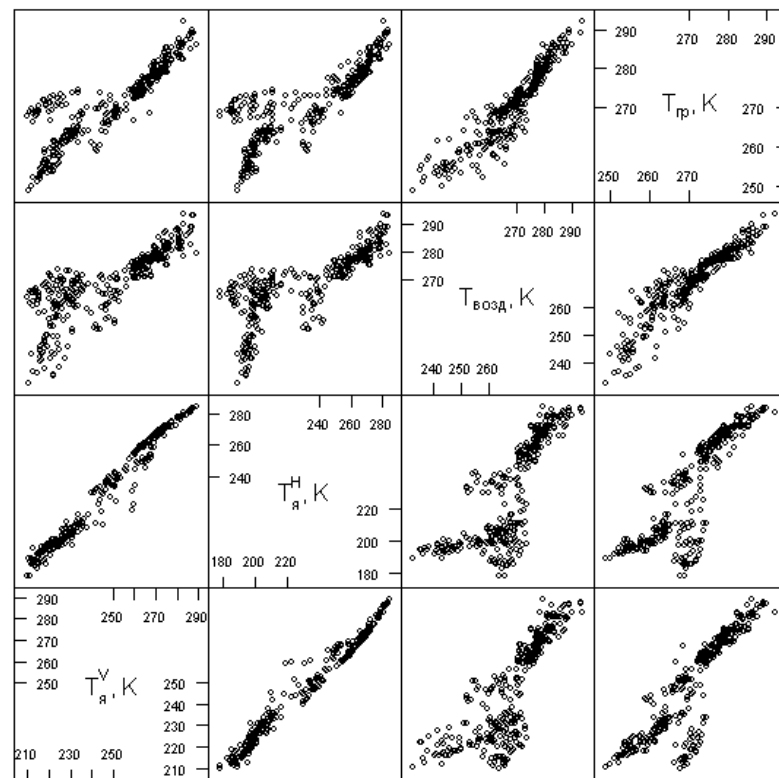


Рисунок 13 – Диаграммы рассеяния в координатах $T_{я}$ ($f = 36,5$ ГГц), $T_{гр}$, $T_{возд}$ для участка У1 в 2007 г.

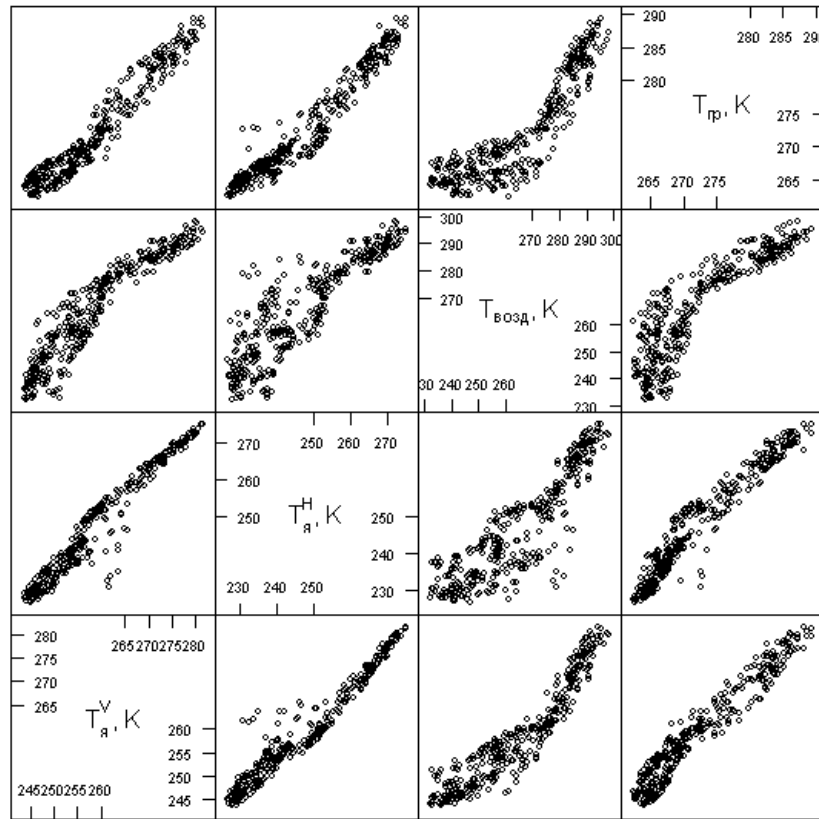


Рисунок 14 – Диаграммы рассеяния в координатах $T_я$ ($f = 6,9$ ГГц), $T_{гр}$, $T_{возд}$ для участка УЗ в 2007 г.

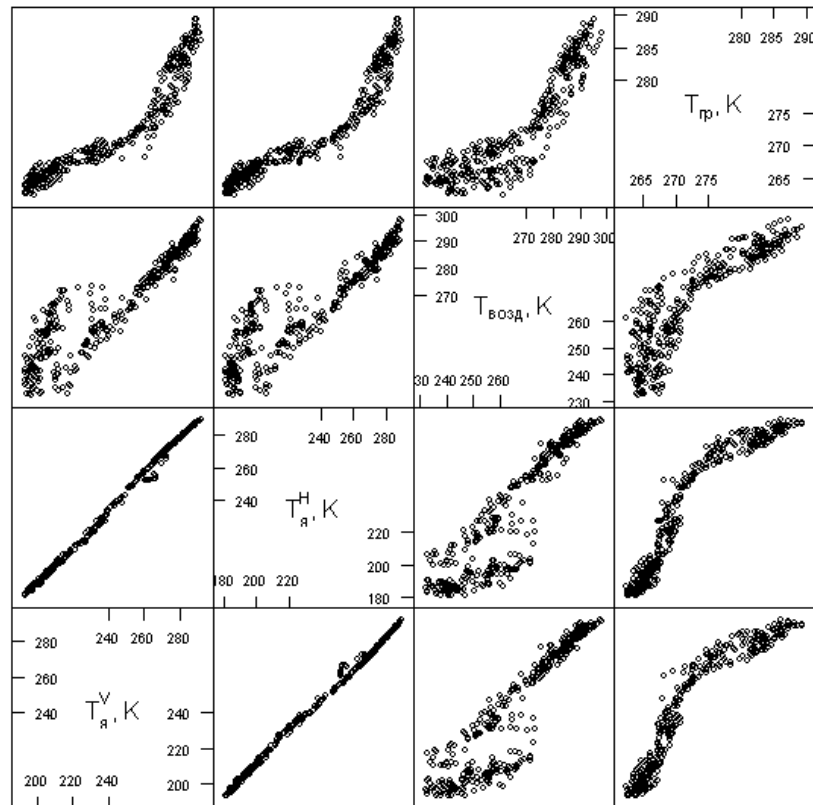


Рисунок 15 – Диаграммы рассеяния в координатах $T_я$ ($f = 36,5$ ГГц), $T_{гр}$, $T_{возд}$ для участка УЗ в 2007 г.

Таблица 8 – Коэффициенты корреляции между $T_{я}$, $T_{возд}$ и $T_{зр}$ для трех тестовых участков в 2005-2008 гг.

Участок У1						
Параметр	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$	$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (V)}}$	$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (H)}}$	$T_{возд}$	$T_{зр}$
$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$	1,00	0,76	0,79	0,77	0,76	0,77
$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$		1,00	0,69	0,74	0,60	0,56
$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (V)}}$			1,00	0,99	0,86	0,85
$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (H)}}$				1,00	0,84	0,84
$T_{возд}$					1,00	0,88
$T_{зр}$						1,00
Участок У2						
Параметр	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$	$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (V)}}$	$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (H)}}$	$T_{возд}$	$T_{зр}$
$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$	1,00	0,74	0,69	0,67	0,72	0,74
$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$		1,00	0,78	0,82	0,69	0,77
$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (V)}}$			1,00	0,99	0,86	0,83
$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (H)}}$				1,00	0,85	0,81
$T_{возд}$					1,00	0,79
$T_{зр}$						1,00
Участок У3						
Параметр	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$	$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (V)}}$	$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (H)}}$	$T_{возд}$	$T_{зр}$
$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$	1,00	0,96	0,92	0,94	0,93	0,97
$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$		1,00	0,90	0,92	0,87	0,95
$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (V)}}$			1,00	0,99	0,68	0,71
$T_{я, f = 36,5 \text{ ГГц (H)}}$				1,00	0,73	0,76
$T_{возд}$					1,00	0,88
$T_{зр}$						1,00

Таблица 9 – Статистические характеристики рядов дистанционных и контактных измерений для участка У1 (Ямал) для периодов А-D 2007 г.

Период	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$		$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$		$T_{возд}$		$T_{зр}$	
	M, K	σ, K	M, K	σ, K	M, K	σ, K	M, K	σ, K
А	254,4	2,7	231,9	3,7	257,4	9,7	258,972	4,2
	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$		$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$		$T_{возд}$		$T_{зр}$	
В	258,1	4,1	222,3	12,6	269,1	3,9	271,3	3,0
	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$		$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$		$T_{возд}$		$T_{зр}$	
С	266,2	4,5	249,6	6,9	281,6	4,1	281,9	3,6
	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$		$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$		$T_{возд}$		$T_{зр}$	
D	257,8	2,3	238,5	8,5	266,3	10,6	269,2	5,8
	$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (V)}}$		$T_{я, f = 6,9 \text{ ГГц (H)}}$		$T_{возд}$		$T_{зр}$	

Особенности изменчивости РЯТ в периоды А-D характеризуют состояние многослойных сред «грунт-снег-атмосфера» «грунт-растительность-атмосфера» на этих временных отрезках. А – период стабильно мёрзлого состояния грунтов и снежного покрова; В – период циклического повторения процессов оттаивания–замерзания (интенсивных фазовых переходов

грунтовой влаги); С – летний, или вегетационный, период; D – осенний период промерзания грунтовых слоёв.

Период А, для которого характерны медленные изменения РЯТ (не более 3 К/сутки на $f = 6,9$ ГГц при V-поляризации и не более 5 К/сутки при H-поляризации), длится от начала календарного года до первых оттепелей в апреле-мае. Фиксируемые незначительные колебания РЯТ связаны главным образом с вариациями $T_{гр}$, поскольку содержание жидкой воды в грунтах при типичных для периода $T_{гр}$ минимально и не влияет на коэффициент излучения среды, что обуславливает постоянство его значений (согласно [103, 108]). Это создает возможность восстановления значений $T_{гр}$ по данным одноканальных 6,9 ГГц радиометрических измерений.

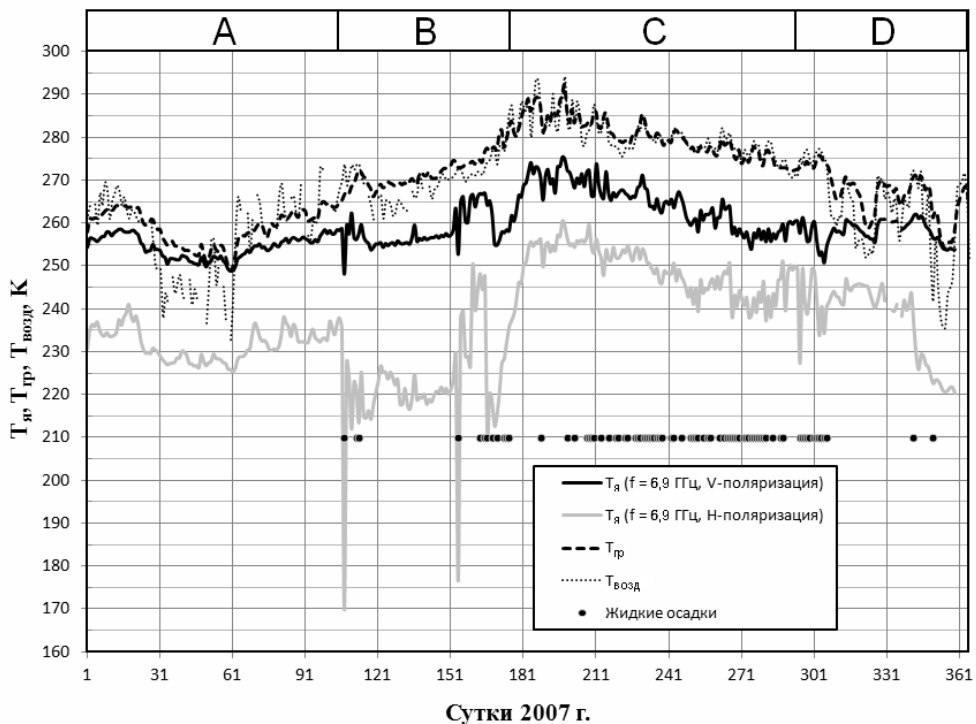


Рисунок 16 – Годовой ход $T_я$ участка У1 (2007 г., ИСЗ «Аqua», AMSR-E, $f = 6,9$ ГГц, V- и H-поляризация), $T_{возд}$ (ГМС Марре-Сале), $T_{гр}$ (ГКС Марре-Сале). • – даты выпадения жидких осадки (ГМС Марре-Сале); А – период стабильно мёрзлого состояния грунтов и снежного покрова; В – период весенне-летних циклов «оттаивание-замерзание»; С – вегетационный период; D – осенний период промерзания грунтов

В период В происходят резкие колебания РЯТ (до 50 К/сутки на $f = 6,9$ ГГц при H-поляризации), часто разнонаправленные для V- и H-поляризованного излучения при используемых углах визирования 55° , что ведет к колебаниям коэффициента поляризации P (

$$P = \frac{T_я^V - T_я^H}{T_я^V + T_я^H}).$$

Предположительно, данные колебания вызваны циклическими процессами «оттаивания-замерзания», в ходе которых существенно изменяется содержание жидкой влаги в

грунте и снежном покрове и, соответственно, СВЧ излучательные свойства слоев многослойной

среды [26, 27]. Сопоставление РЯТ участков У1, У2, У3 с метеоданными с ближайших к ним ГМС и результатами измерения T_{zp} на площадках ГКС (см. рисунки 16 и 17) показывает, что наиболее резкое уменьшение РЯТ и увеличение P в 2005-2008 гг. происходило в дни, когда на повышение $T_{возд}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ накладывалось выпадение жидких осадков. Для объяснения этого факта нами было выдвинуто предположение, что указанное поведение РЯТ может быть обусловлено насыщением слоев снега (а после схода снежного покрова – грунта) водой вследствие совокупного действия осадков и процессов таяния. Однако при отсутствии одного из обозначенных факторов наблюдаемые колебания РЯТ оказываются не столь велики, что отражено на рисунке 17.

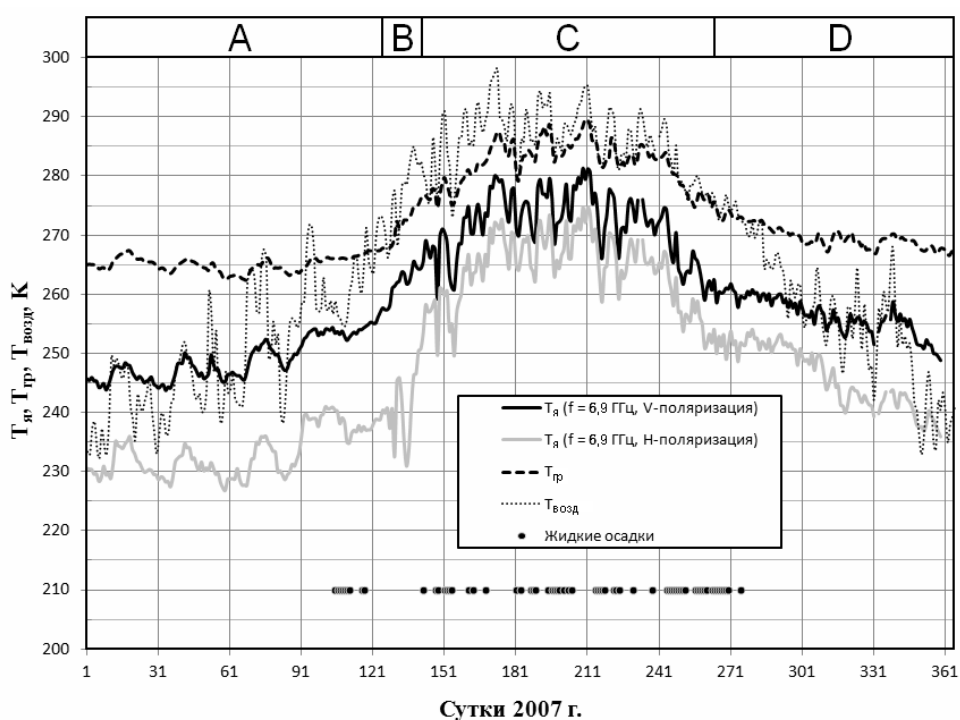


Рисунок 17 – Годовой ход $T_{я}$ участка У3 (2007 г., ИСЗ «Аqua», AMSR-E, $f=6,9$ ГГц, V- и H-поляризация), $T_{возд}$ (ГМС Черский), $T_{гр}$ (ГКС г. Родинка). • – даты выпадения жидких осадки (ГМС Черский); А – период стабильно мёрзлого состояния грунтов и снежного покрова; В – период интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги; С – вегетационный период; D – осенний период промерзания грунтов

Одна из наиболее значимых «точек» годового цикла, позволяющая получать дополнительные априорные данные о грунте по СВЧ данным, также находится в границах периода В. В течение небольшого промежутка времени после схода снежного покрова результирующее излучение многослойной среды практически полностью состоит из излучения собственно талого грунта, не экранированного слоями растительности и снега. В этой «точке» кривой годового хода РЯТ может быть определена максимальная влажность грунта и шероховатость его поверхности в пределах исследуемого участка.

Период С охватывает часть календарного года между началом вегетационного сезона и первыми заморозками. Он характеризуется отсутствием резких колебаний РЯТ более 2 К/сутки на $f = 6,9$ ГГц для V-поляризации и 6 К/сутки для H-поляризации и существенным уменьшением коэффициента поляризации. При сглаживании ежедневных колебаний РЯТ с помощью скользящего окна становится ярко выраженным постепенное увеличение РЯТ в первой половине периода и еще более плавное уменьшение РЯТ во второй его половине. Согласно [121], малые значения P на рассматриваемом отрезке годового хода могут быть связаны с деполяризующим влиянием растительного покрова, обусловленным проявлением эффектов рассеяния. Период D длится от первых заморозков и до конца календарного года. В начале этого периода фиксируются резкие колебания РЯТ, связанные с циклическими процессами замерзания-оттаивания, а после установления стабильно отрицательных температур происходит постепенное понижение РЯТ.

Положение границ между выделенными периодами А-D в разные годы существенно различается (см. таблица 10). Обращает на себя внимание факт, что продолжительность периода В для участка У3 значительно меньше таковой для У1 и У2, что может быть связано с большей континентальностью климата в ВС и особенностями рельефа участка У3. Вследствие этого первые оттепели проявляются позднее, чем в ЗС, а таяние снежного покрова происходит в более сжатые сроки, что в конечном итоге и обуславливает малую длительность периода В.

Таблица 10 – Временные границы периодов А, В, С, D годового цикла для тестовых тундровых участков У1, У2, У3

Участок У1, Ямал				
Год	Период А	Период В	Период С	Период D
2005	1-131	132-152	153-267	268-365
2006	1-127	128-148	148-258	259-365
2007	1-106	107-166	167-267	268-365
2008	1-87	88-170	171-269	270-366
Участок У2, Воркута				
Год	Период А	Период В	Период С	Период D
2005	1-129	130-140	141-255	256-365
2006	1-125	126-151	152-258	259-365
2007	1-96	97-139	140-270	271-365
2008	1-3	4-170	171-269	269-366
Участок У3, Колыма				
Год	Период А	Период В	Период С	Период D
2005	1-116	117-149	150-260	261-365
2006	1-129	130-142	143-258	259-365
2007	1-124	125-136	137-264	265-365
2008	1-121	122-141	142-261	262-366

Наиболее существенные различия в положении границ между периодами А-D на всех участках наблюдаются для пары годов с контрастными зимними сезонами, 2006 (холодный) и 2007 (теплый). Зафиксированные изменения в годовом ходе РЯТ в 2007 г. относительно 2006 г. хорошо согласуются с данными ежегодных отчетов Росгидромета, в соответствии с которыми первому из них присваивается статус экстремально холодного, а второму — экстремально теплого года [15].

Сравнение графиков временной изменчивости РЯТ трех участков позволяет отметить следующее. РЯТ для У1 и У2 изменяется практически синфазно, что, по мнению автора, может свидетельствовать об однонаправленном действии влияющих на РЯТ факторов для «ключевых» районов, где данные участки расположены. В парах У1-У3, У2-У3 на большинстве временных отрезков наблюдаются колебания РЯТ в противофазе.

Мерзлое состояние грунтов наблюдается в период стабильно мерзлого состояния грунтов и период интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги, границы которых могут быть выявлены визуально по кривым годового хода РЯТ и по статистическим параметрам временных рядов РЯТ. Поэтому предложенное деление календарного года на периоды может служить источником выбора индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов. В контексте настоящей работы под индикаторами изменчивости состояния мерзлых грунтов понимаются производные показатели, изменчивость которых во времени позволяет судить о наличии изменений в состоянии мерзлых грунтов. Поскольку содержание жидкой воды в грунтах в мерзлом состоянии тесно связано с их термодинамической температурой и может быть описано определенными для разных типов грунтов температурно-влажностными зависимостями, T_{sp} выступает в качестве основного параметра состояния мерзлых грунтов. Поэтому в списки индикаторов автором включены показатели, значения которых рассчитываются непосредственно по значениям T_{sp} , и показатели, косвенно связанные с этим параметром.

В качестве индикаторов изменчивости состояния грунтов во внутригодовом масштабе выбраны следующие показатели:

1. T_{sp} , усредненная за сутки (*И1с*);
2. Мерзлое / талое состояние грунта (*И2с*);
3. Принадлежность к одному из периодов годового цикла А – D (*И3с*).

Список индикаторов изменчивости состояния грунтов в межгодовом масштабе содержит три показателя, значения которых могут быть определены по значениям индикаторов И1с-И3с:

1. T_{cp} , усредненная за полные календарные месяцы года со стабильно мерзлым состоянием грунтов – январь и февраль (И1г).
2. Продолжительность периода стабильно мерзлого состояния грунтов А (И2г);
3. Продолжительность периода интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги В (И3г).

Ограничение временного интервала, за который проводится усреднение для первого индикатора, двумя первыми месяцами года сделано для получения оценок значений T_{cp} лишь в период стабильно мерзлого состояния грунтов с учетом возможного изменения положения границы между периодами А и В в разные годы.

Таким образом, каждый год по состоянию грунтов на исследуемом участке может быть охарактеризован значениями трех индикаторов, определяемыми (восстанавливаемыми) по спутниковым СВЧ радиометрическим данным. Изменчивость значений этих индикаторов в межгодовом масштабе оценивается с применением инструментов математической статистики. Базовыми результатами такой оценки являются значения трендовых составляющих межгодовой изменчивости состояния мерзлых грунтов и меры вариабельности индикаторов (в первую очередь СКО).

2.3.2 Выбор подходов к определению значений индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов

Определение значений индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов во внутригодовом и межгодовом масштабе проводится в два этапа:

1. Восстановление значений среднесуточных T_{cp} и определение положения границ между периодами А-Д;
2. Расчет значений индикаторов.

Именно первый этап, исходя из результатов анализа литературных источников (см. разделы 1.4-1.6), представляет наибольшую сложность в ходе оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов. Для выбора подхода к определению значений индикаторов проведен дополнительный анализ данных спутниковых СВЧ радиометрических и наземных измерений.

Для выявления периодов годового цикла, в пределах которых связь между $T_{я}$ и T_{cp} близка к линейной, был выполнен анализ диаграмм рассеяния и коэффициентов корреляции для каждого из периодов А-Д. Результаты расчетов r для участка У1 в 2007 г. приведены в таблице 11. Максимальная корреляция между рассматриваемыми величинами наблюдается в периоды А и С, минимальная – в периоды В и Д. Причиной малых значений r для периодов В и Д является,

прежде всего, нелинейность температурно-влажностной зависимости для грунтов в интервале $T_{гр}$ 263-274 К [62]. К этому добавляется существенное изменение диэлектрических и СВЧ излучательных свойств снежного покрова при его увлажнении [87, 127, 129]. Из-за всего вышперечисленного направленность изменений РЯТ на $f = 6,9$ ГГц в дни оттепелей не совпадает с направленностью изменений $T_{гр}$. При последующем промерзании грунта и замерзании снежного покрова изменения происходят в основном синфазно. Суммарный эффект в масштабе всего периода выражается в уменьшении абсолютной величины коэффициента корреляции. На $f = 36,5$ ГГц синфазность изменений $T_{я}$ и $T_{гр}$ нарушена в меньшей степени за счет отличия диэлектрических свойств воды на данной частоте, что, несмотря на значительный вклад в излучение многослойной системы излучения снежного покрова, обуславливает большую корреляцию между $T_{я}$ и $T_{гр}$ в периоды В и D для $f = 36,5$ ГГц.

Таблица 11 – Коэффициенты корреляции r между рядами дистанционных и контактных измерений для участка У1 (Ямал) для периодов А-D 2007 г.

Весь год				
	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К	$T_{возд}$, К	$T_{гр}$, К
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	1	0,73	0,75	0,84
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К		1	0,53	0,57
$T_{возд}$, К			1	0,92
$T_{гр}$, К				1
Период А				
	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К	$T_{возд}$, К	$T_{гр}$, К
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	1	0,90	0,82	0,97
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К		1	0,74	0,85
$T_{возд}$, К			1	0,84
$T_{гр}$, К				1
Период В				
	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К	$T_{возд}$, К	$T_{гр}$, К
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	1	0,71	0,47	0,60
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К		1	-0,03	0,24
$T_{возд}$, К			1	0,68
$T_{гр}$, К				1
Период С				
	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К	$T_{возд}$, К	$T_{гр}$, К
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	1	0,87	0,58	0,79
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К		1	0,37	0,53
$T_{возд}$, К			1	0,86
$T_{гр}$, К				1
Период D				
	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К	$T_{возд}$, К	$T_{гр}$, К
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (V), К	1	0,41	0,21	0,23
$T_{я, f = 6,9}$ ГГц (H), К		1	0,51	0,53
$T_{возд}$, К			1	0,92
$T_{гр}$, К				1

Из диаграмм рассеяния следует, что в периоды В и С зависимость между $T_{я}$ и $T_{зр}$ с трудом поддается описанию с помощью наиболее распространенных функций, используемых для аппроксимации (пример для линейных функций представлен на рисунке 18). Достоверность аппроксимации в данном случае недостаточна для рекомендации конкретной функции к использованию. Даже при высоких значениях r восстановление значений $T_{зр}$ с помощью моделей парной регрессии по одноканальным измерениям РЯТ как на $f = 6,9$ ГГц, так и на $f = 36,5$ ГГц в периоды В и D нельзя произвести с удовлетворительной точностью.

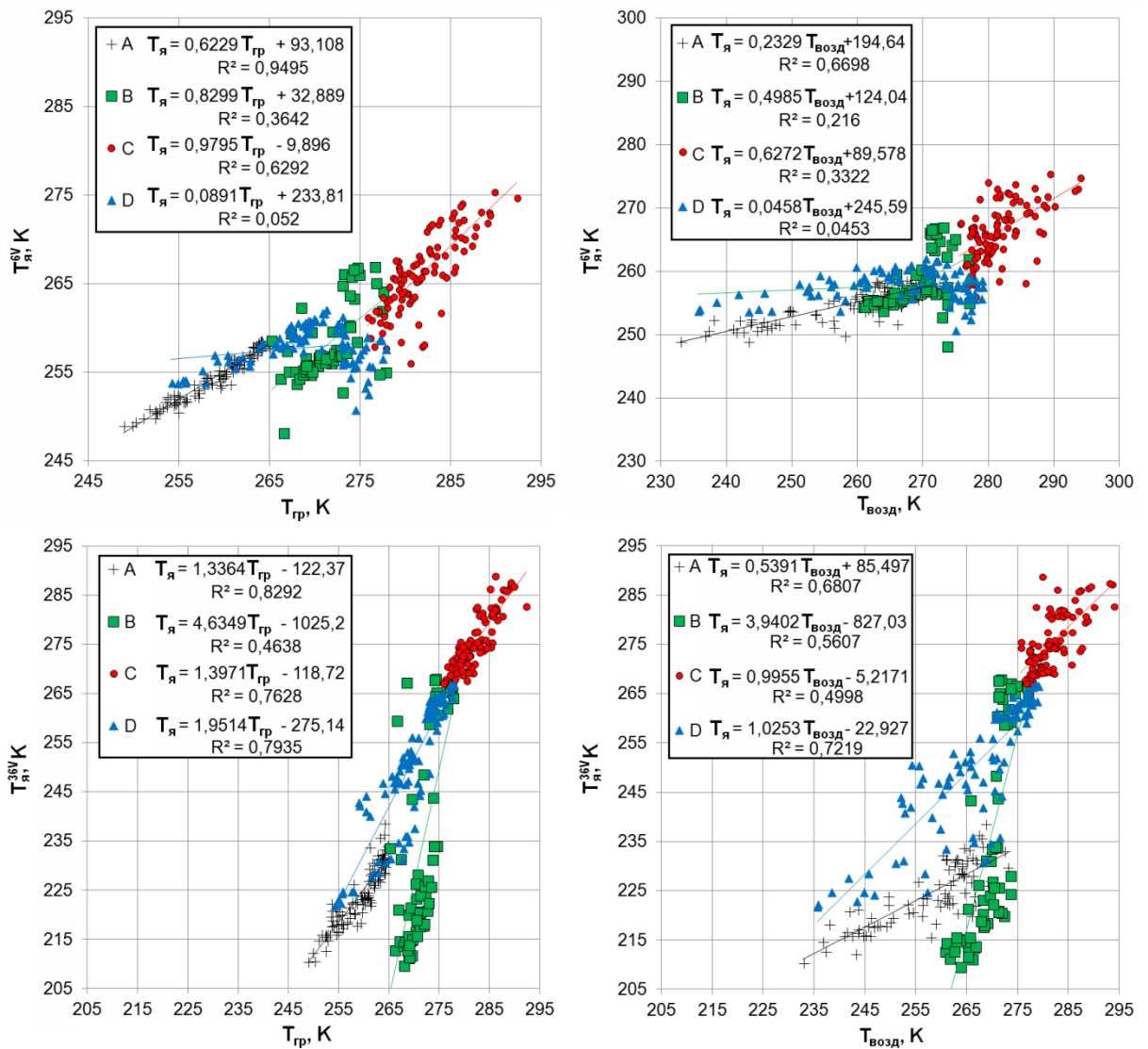


Рисунок 18 – Диаграммы рассеяния в пространствах $T_{я}$ (V) – $T_{возд}$ и $T_{я}$ (V) – $T_{зр}$ с линейной аппроксимацией зависимости между величинами для периодов годового цикла А-Д (данные для участка У1, 2007 г., $f = 6,9$ ГГц, 36,5 ГГц, V-поляризация)

Как было показано в работах [94, 134], для восстановления значений T_{sp} по СВЧ данным в отдельных случаях могут быть использованы модели множественной регрессии. Однако отсутствие физических обоснований таких моделей не позволяет считать их надежными решениями для условий Арктики при недостатке данных опорных контактных измерений для значительных по площади районов. Согласно представленным в [94] результатам, нет и значимых причин полагать, что увеличение размерности пространства независимых переменных обеспечит существенное повышение точности восстановления значений T_{sp} в периоды годового цикла В и D.

Альтернативный подход, который может быть использован при восстановлении значений T_{sp} , заключается в построении моделей, позволяющих описать связи между T_a и T_{sp} на основе теории переноса СВЧ излучения и релаксационной теории Дебая. В условиях недостатка данных опорных контактных измерений этот подход представляется автору наиболее рациональным, и потому был практически реализован в разработанном методе оценки изменчивости состояния грунтов. В его основу положена модель собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера», позволяющая описать связи между результирующей РЯТ среды и параметрами состояния входящего в ее состав грунта. Вследствие меньшей зависимости РЯТ среды от свойств сухого снежного покрова и пониженного влияния атмосферы на $f = 6,9$ ГГц данная частота выбрана в качестве базовой для восстановления значений T_{sp} .

Для определения положения границ между периодами годового цикла было выбрано два конкурирующих подхода. На этапе предварительного анализа данных оценить их эффективность для распознавания конкретных границ из них не представляется возможным, поэтому было принято решение провести сравнительные испытания подходов в ходе создания программно-алгоритмического обеспечения.

Первый подход предполагает распознавание границ периодов по значениям статистических параметров выборок, выделяемых «скользящим окном» из годовых рядов одноканальных измерений РЯТ на $f = 6,9$ ГГц, второй подход использует для этой цели спектральный градиент РЯТ между каналами 6,9 ГГц и 36,5 ГГц. Использование для распознавания границ одноканальных измерений выглядит предпочтительнее, так как в таком случае минимизируется количество вычислительных операций при использовании подхода в составе комплексного алгоритма оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ данным с опорной частотой 6,9 ГГц.

Как было отмечено, четыре типовых периода, фиксируемых по данным СВЧ измерений и обозначенных буквами А, В, С, D, отличаются средними значениями РЯТ (M) и стандартным отклонением РЯТ (σ). В таблице 12 представлены данные за 2007 г. для участка У1.

В случае первого подхода в качестве базовых признаков, позволяющих количественно описать выявляемые визуально особенности изменчивости РЯТ в периоды А-D на $f = 6,9$ ГГц, было рассмотрено 4 статистических параметра: математическое ожидание в рядах РЯТ на V- и H-поляризации и стандартное отклонение в рядах РЯТ на V- и H-поляризации. Наибольшие различия в значениях M , σ между периодами годового цикла зафиксированы на H-поляризации. Это обусловило ориентацию первого подхода на использование данных СВЧ съемки на H-поляризации. Согласно результатам анализа временных рядов РЯТ для тундровых участков с разной площадью водных объектов в их пределах [27], появление открытой водной поверхности на участке в период С оказывает большее влияние на M , чем на σ . Для достижения минимальной чувствительности к доле площади участков суши, занимаемой водными объектами, в качестве базового информативного признака, характеризующего временную изменчивость СВЧ излучения многослойной среды, для решения задачи распознавания границ периодов А-D было выбрано стандартное отклонение в рядах РЯТ на H-поляризации.

Таблица 12 – Статистические характеристики рядов T_y в периоды годового цикла А-D для участка на п-ове Ямал У1 (на материале СВЧ съемки AMSR-E 2007 г.). M – математическое ожидание, σ – стандартное отклонение

Параметр	Период			
	А	В	С	Д
$M (T_y, f = 6,9 \text{ ГГц}, V), K$	254,4	258,1	266,2	257,8
$M (T_y, f = 6,9 \text{ ГГц}, H), K$	231,9	222,3	249,6	238,5
$\sigma (T_y, f = 6,9 \text{ ГГц}, V), K$	2,7	4,1	4,5	2,3
$\sigma (T_y, f = 6,9 \text{ ГГц}, H), K$	3,7	12,6	6,9	8,5
$M (T_y, f = 36,5 \text{ ГГц}, V), K$	223,7	232,4	275,1	250,2
$M (T_y, f = 36,5 \text{ ГГц}, H), K$	200,0	207,4	271,2	237,2
$\sigma (T_y, f = 36,5 \text{ ГГц}, V), K$	6,2	20,5	5,8	13,0
$\sigma (T_y, f = 36,5 \text{ ГГц}, H), K$	6,1	25,3	6,2	21,7

Второй подход к распознаванию границ основан на вычислении спектрального градиента РЯТ между каналами 36,5 ГГц и 6,9 ГГц. В работе [100] впервые было отмечено, что спектральный градиент РЯТ между каналами 36,5 ГГц, 19 ГГц и 6,9 ГГц может служить индикатором процессов таяния/оттаивания подстилающей поверхности (снежного покрова, верхнего слоя грунта). Этот факт был использован в ряде исследований для определения «статуса» (мерзлого или талого состояния) природных сред [125, 136]. Наиболее часто используется разница между РЯТ при $f = 36,5$ ГГц и $f = 19$ ГГц (в основном это вызвано специфическим набором спектральных каналов СВЧ радиометра SSM/I, данные с которого анализируются в таких исследованиях). Однако спектральный градиент РЯТ между $f = 36,5$ ГГц и $f = 6,9$ ГГц обладает большей чувствительностью к кратковременным оттепелям в периоды В

и D (см. рисунок 10). Поэтому в случае подхода, использующего данные с двух каналов СВЧ радиометра, в качестве основного базового информативного признака для распознавания границ была выбрана разность РЯТ на $f = 36,5$ ГГц и $f = 6,9$ ГГц.

2.4 Разработка модели собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера»

2.4.1 Описание радиояркостной температуры многослойной среды «грунт-снег-атмосфера»

Модель собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера», необходимая для решения обратной задачи восстановления T_{sp} , разработана автором на основе модельного описания, предложенного в ГГО им. А.И.Воейкова [22, 104]. В настоящей работе классическое модельное описание было усовершенствовано в части расчета КДП слоев среды и дополнено элементами, реализующими новый подход к учету влияния макрорельефа земной поверхности на СВЧ излучательные свойства многослойной среды.

Согласно результатам численных и натуральных экспериментов, на частоте 6,9 ГГц, выбранной в качестве базовой для спутникового СВЧ мониторинга мерзлых грунтов Арктики, максимальная толщина грунтового слоя, формирующего излучение, составляет несколько сантиметров (при минимальном содержании незамерзшей влаги), на больших частотах и при большем влагосодержании величина скин-слоя уменьшается [67]. Из-за этого СВЧ радиометрия на $f = 6,9$ ГГц позволяет диагностировать резкие изменения излучательной способности среды лишь в начальной фазе промерзания грунтовых толщ, когда условный фронт промерзания/оттаивания располагается вблизи дневной поверхности грунта. В связи с данным фактом было принято решение рассматривать грунт как условно однородный слой с изменяющимися во времени параметрами (T_{sp} и W). Аналогичные допущения о вертикальной однородности приняты для снежного покрова, рассматриваемого как «облачный слой» [32, 91].

Набор слоев СВЧ излучающей среды меняется в зависимости от временного отрезка внутригодовой изменчивости. В периоды внутригодовой изменчивости А, В и D (см. раздел 2.4) набор включает грунт, снежный покров и атмосферу. В вегетационный период С, подробное рассмотрение которого оставлено за рамками настоящей работы, между грунтом и атмосферой располагается слой растительности. В конце периода В – начале С (на временном отрезке сразу после схода снежного покрова) модельное описание сводится к системе «грунт-атмосфера». Слоям присвоены следующие индексы i : 1 – атмосфера, 2 – снежный покров, 3 – грунт.

Ниже представлены электрические параметры, характеризующие каждый из слоев моделируемой трехслойной среды:

ε'_i – вещественная часть КДП слоя i ,

ε''_i – мнимая часть КДП слоя i ,

$$n_i = \sqrt{\frac{\varepsilon'_i + \sqrt{(\varepsilon'_i)^2 + (\varepsilon''_i)^2}}{2}} \quad (7)$$

– коэффициент преломления слоя i ,

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{-\varepsilon'_i + \sqrt{(\varepsilon'_i)^2 + (\varepsilon''_i)^2}}{2}} \quad (8)$$

– коэффициент поглощения слоя i .

Коэффициенты преломления и поглощения для слоя i с учетом угла падения:

$$\tilde{n}_i = \sqrt{\frac{n_i^2 - \kappa_i^2 - \sin^2 \theta_1}{2}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2 \kappa_i^2}{(n_i^2 - \kappa_i^2 - \sin^2 \theta_1)^2}}\right), \quad (9)$$

$$\tilde{\kappa}_i = \sqrt{\frac{n_i^2 - \kappa_i^2 - \sin^2 \theta_1}{2}} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2 \kappa_i^2}{(n_i^2 - \kappa_i^2 - \sin^2 \theta_1)^2}}\right), \quad (10)$$

где θ_1 – угол между визирующим лучом и локальной нормалью к поверхности в точке их пересечения с земной поверхностью (угол визирования).

$|R_{ik}^V|^2 = r_{ik}^V$, $|R_{ik}^H|^2 = r_{ik}^H$ – коэффициенты отражения Френеля на границе раздела двух слоев i и k для вертикальной и горизонтальной поляризаций соответственно (номера слоев $i, k = 1, 2, 3$) [36, 55, 96]:

$$\begin{aligned} |R_{ik}^V|^2 &= \frac{\left[((n_i^2 - \kappa_i^2)\tilde{n}_k + 2n_k \kappa_k \tilde{\kappa}_i) - ((n_k^2 - \kappa_k^2)\tilde{n}_i + 2n_i \kappa_i \tilde{\kappa}_k) \right]^2 + \left[((n_i^2 - \kappa_i^2)\tilde{\kappa}_k + 2n_i \kappa_i \tilde{n}_k) - ((n_k^2 - \kappa_k^2)\tilde{\kappa}_i + 2n_k \kappa_k \tilde{n}_i) \right]^2}{\left[((n_i^2 - \kappa_i^2)\tilde{n}_k - 2n_k \kappa_k \tilde{\kappa}_i) + ((n_k^2 - \kappa_k^2)\tilde{n}_i - 2n_i \kappa_i \tilde{\kappa}_k) \right]^2 + \left[((n_i^2 - \kappa_i^2)\tilde{\kappa}_k + 2n_i \kappa_i \tilde{n}_k) + ((n_k^2 - \kappa_k^2)\tilde{\kappa}_i + 2n_k \kappa_k \tilde{n}_i) \right]^2} \\ |R_{ik}^H|^2 &= \frac{(\tilde{n}_i - \tilde{n}_k)^2 + (\tilde{\kappa}_i - \tilde{\kappa}_k)^2}{(\tilde{n}_i + \tilde{n}_k)^2 + (\tilde{\kappa}_i + \tilde{\kappa}_k)^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Удельное поглощение слоя, обозначаемое $\tilde{\alpha}_{zi}$, для угла θ_1 , отличного от нуля, вычисляется по формуле:

$$\tilde{\alpha}_{zi} = \frac{4\pi\kappa_i}{\lambda} \sec \theta_1. \quad (12)$$

Величины углов θ_i и θ_{i+1} связаны между собой законом Снеллиуса:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_{i+1}} = \frac{n_{i+1}}{n_i}. \quad (13)$$

Толщина скин-слоя для однородной среды с плоскопараллельными границами:

$$l_s = \frac{1}{\alpha_{si} \sec \theta_i}. \quad (14)$$

РЯТ излучающей трехслойной системы «грунт-снег-атмосфера»:

$$T_{я} = (1 - r_{21}) [(1 + r_{23} e^{-\tilde{\alpha}_2 l_2}) \cdot T_2 (1 - e^{-\tilde{\alpha}_2 l_2}) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (r_{21}^n r_{23}^n e^{-2n\tilde{\alpha}_2 l_2}) + (1 - r_{23}) \cdot T_3 \cdot e^{-\tilde{\alpha}_2 l_2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (r_{21}^n r_{23}^n e^{-2n\tilde{\alpha}_2 l_2})] \quad (15)$$

r_{ik} вычисляются для вертикальной и горизонтальной поляризации сигнала для каждой границы между слоями. Первый член суммы, стоящей в квадратных скобках, представляет прямое излучение второго слоя, а также переотраженное на границе второго и третьего слоя и ослабленное излучение второго слоя (с учетом многократного переотражения на границах 1-2 и 2-3). Второй член суммы учитывает вклад в РЯТ системы излучения третьего слоя с учетом ослабления во втором слое и многократного переотражения на границах 1-2 и 2-3.

Расчет РЯТ излучающей системы «Земля-атмосфера» выполняется в соответствии со следующим выражением:

$$T_{я.результ} = T_n \Sigma e^{-\tau \cdot \sec \theta} + T_{cp.атм.} (1 - e^{-\tau \cdot \sec \theta}) + (1 - \Sigma)(1 - e^{-\tau \cdot \sec \theta}) T_{cp.атм.} e^{-\tau \cdot \sec \theta}, \quad (16)$$

где Σ – коэффициент излучения системы «грунт-снег»,

T_n – термодинамическая температура этой системы,

τ – оптическая плотность атмосферы,

$T_{cp.атм.}$ – усредненная температура атмосферы.

Исходя из результатов расчетов для большинства моделей облачной атмосферы [8], максимальная разность между РЯТ системы «Земля-атмосфера» в пределах мгновенного угла обзора СВЧ радиометра (формула 16) и РЯТ среды «грунт-снег-атмосфера» в пределах того же угла (формула 15) на $f = 6,9$ ГГц составляет 1-3 К. В связи с этим было принято решение в целях упрощения расчетной схемы не выполнять атмосферную коррекцию и считать величину, вычисляемую по формуле 15, результирующей РЯТ, фиксируемой СВЧ радиометром на $f = 6,9$ ГГц.

2.4.2 Описание диэлектрических свойств слоев многослойной среды

Согласно теории миграции влаги, в ходе сезонного оттаивания деятельного слоя ММГ происходит движение воды в грунте к фронту таяния вплоть до достижения ей водоупорного ПМС, что вызывает неравномерное насыщение слоев грунтов водой и является причиной активного переноса минеральных солей и органических веществ к границе ПМС [61]. Вследствие этого состав поверхностных слоев грунтов над ПМС в области распространения ММГ существенно различается с составом горизонтов на тех же глубинах для СМГ. Незаторфованные грунты Арктики резко отличаются от грунтов лежащих к югу территорий, в частности, лежащих в зоне тайги, по содержанию гумуса (таблица 13).

Малое содержание гумуса, имеющего отличные от песка и глины диэлектрические свойства [7], позволяет рассматривать незаторфованные грунты Арктики в качестве условно однородных смесей физического песка и глины. По этой причине, по мнению автора, моделирование электрических свойств незаторфованных грунтов Арктики для целей дистанционного СВЧ мониторинга целесообразно проводить на основе приближений для грунтов не ассоциированных с конкретными ландшафтными и почвенными зонами типов: песка, супеси, суглинка, глины.

Таблица 13 – Характеристики грунтов Эвенкии (1-3) и Красноярского края (4-6) (информация из [7])

Тип грунта / горизонт	Глубина взятия образца, см	Содержание гумуса, %	Содержание физической глины, %	Содержание физического песка, %	Максимальное содержание связанной влаги
1. Гранузем палевый / В	15-20	0,3	4,4	49,1	2,7
2. Криозем гомогенный / В	25-30	2,3	20,5	43,8	7,4
3. Криозем тиксотропный	45-59	1,2	28,4	53,7	5,6
4. Лесная почва / А ₁	5-10	8,3	18,1	57,7	9
5. Пашня / А ₂	10-15	10,3	12,1	75,2	8
6. Пашня / В ₂	20-40	10,4	11,9	85,9	5

Для вычисления значений КДП условно вертикально-однородных слоев грунта в исследовании использована модифицированная рефракционная модель, в которой учитывается наличие в грунте связанной влаги [7, 110]. Расчет ведется по формуле

$$\sqrt{\dot{\epsilon}_{\Sigma}} = W\sqrt{\dot{\epsilon}_{H_2Oсвяз}} + (1-W)\sqrt{\dot{\epsilon}_{мин}} \quad (17)$$

если объемное содержание воды W в грунте не превышает максимальное пороговое значение W_t , при котором вся вода является связанной, то есть $W < W_t$, и по формуле

$$\sqrt{\dot{\epsilon}_{\Sigma}} = W_t\sqrt{\dot{\epsilon}_{H_2Oсвяз}} + (1-W)\sqrt{\dot{\epsilon}_{мин}} + (W - W_t)\sqrt{\dot{\epsilon}_{H_2Oсвоб}} \quad (18)$$

если $W \geq W_t$. Здесь $\dot{\epsilon}_{H_2Oсвяз}$ – КДП связанной воды, $\dot{\epsilon}_{H_2Oсвоб}$ – КДП свободной воды, $\dot{\epsilon}_{мин}$ – КДП минерального скелета и льда.

Малая исследованность диэлько-температурных зависимостей грунтов [60] создает необходимость определения характера связи между КДП и $T_{гр}$ грунтовых слоев на основе имеющихся данных для основных типов грунтов. В настоящей работе использованы данные о количестве жидкой влаги, содержащемся при разных температурах в песке, супеси, суглинке, глине, из [62]. На основе температурно-влажностных зависимостей путем расчетов по формулам 17, 18 могут быть найдены типовые диэлько-температурные зависимости (рисунок 19).

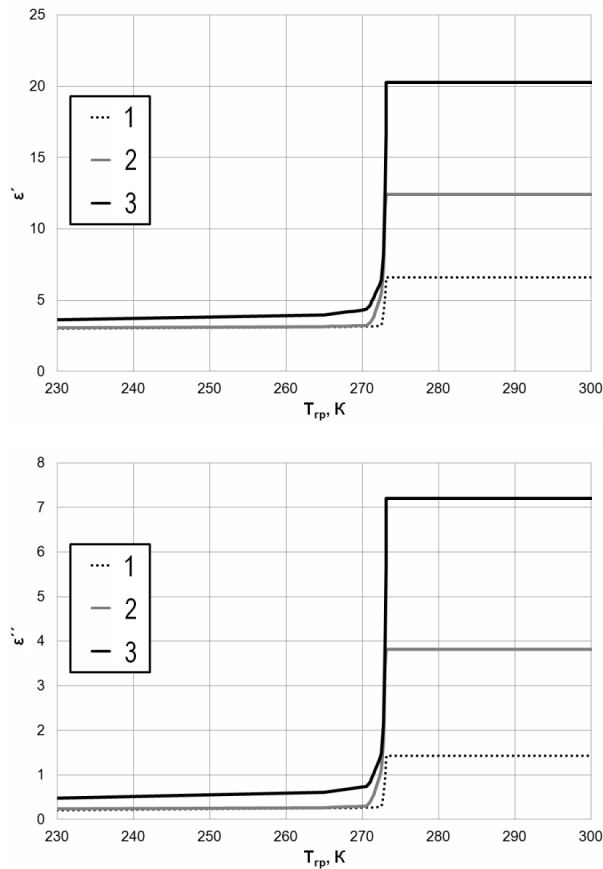


Рисунок 19 – Диэлько-температурные зависимости для трех типов грунтов, рассчитанные по температурно-влажностным зависимостям из [62]: 1 – песок, $W = 15\%$, $W_t = 2\%$; 2 – суглинок, $W = 34\%$, $W_t = 7\%$; 3 – глина, $W = 50\%$, $W_t = 8\%$

Значения КДП сухого снежного покрова принимаются равными значениям из работы [87]. Диэлектрические константы влажного снежного покрова вычисляются по эмпирическим формулам, предложенным в работе [89]:

$$\varepsilon'_{\text{снег}} = 1 + 1,83\rho_{\text{снег}} + 0,02w_{\text{снег}}^{1,015} + \frac{0,073w_{\text{снег}}^{1,31}}{1 + (f/9,07)^2}, \quad (19)$$

$$\varepsilon''_{\text{снег}} = \frac{0,073(f/9,07)w_{\text{снег}}^{1,31}}{1 + (f/9,07)^2}, \quad (20)$$

где f – частота зондирования (ГГц), $w_{\text{снег}}$ – объемная влажность снежного покрова (%), ρ – плотность снега (мг/м³).

2.4.3 Учет влияния макрорельефа земной поверхности на СВЧ излучательные свойства многослойной среды «грунт-снег-атмосфера»

Изменение геометрии визирования, обусловленное особенностями рельефа, может являться причиной значительных расхождений между измеренными со спутника РЯТ и РЯТ, рассчитанными с помощью моделей, которые не предусматривают поправки на шероховатость земной поверхности [9, 132]. Изменение СВЧ излучательных свойств многослойных сред при размерах неровностей, значительно превышающих длину волны зондирования, происходит в основном за счет локального изменения угла визирования и поворота плоскостей V- и H-поляризации – см. схему визирования на рисунке 20. Наиболее ярко указанные эффекты проявляются в зимний период, когда поверхность грунта не покрыта слоем растительности, существенно меняющим излучательные свойства многослойной системы за счет эффектов рассеяния [64, 67, 91]. Разработка методов учета крупномасштабных неровностей (макрорельефа) земной поверхности при дистанционных СВЧ измерениях активно велась с применением фацетной теории в 1970-е – 1980-е гг. [9, 24]. Современные подходы к учету влияния макрорельефа на СВЧ излучательные свойства подстилающей поверхности [78, 81, 99, 119] основаны на описании геометрии зондирования в декартовой системе координат, предложенном в классических работах [9, 122]. Применяемые в этих случаях базисы предполагают отсчет «горизонтальных» углов от проекции визирующего луча на плоскость XOY , касательную к поверхности эллипсоида в точке пересечения оси диаграммы направленности антенны с земной поверхностью. Согласно [99] эффективный (локальный) угол визирования $\theta_{эфф}$ в такой системе координат определяется следующим образом: $\cos\theta_{эфф} = \sin\theta \sin(\text{slope}) \cos\psi + \cos\theta \cos(\text{slope})$, где θ – угол визирования, ψ – угол между проекцией нормали к элементарной площадке и проекцией визирующего луча на XOY , slope –

уклон элементарной площадки. Угол поворота плоскостей поляризации ξ находится из формулы $\sin \xi = \sin \psi \sin(\text{slope}) / \sin \theta_{\text{эфф}}$. Угол ψ в рамках такого «векторно-углового» подхода может быть определен в ходе дополнительных вычислений по информации об азимуте визирующего луча относительно плоскости меридиана, при спутниковом СВЧ зондировании предоставляемой организациями-операторами спутниковой съемки. При авиационных СВЧ измерениях для определения ψ требуется организация вспомогательных расчетов по данным глобального позиционирования авиаплатформы. В настоящем разделе производится разработка нового подхода к определению геометрии визирования, позволяющего решить обозначенные проблемы, для чего предложен соответствующий математический аппарат, и создание на его основе методики учета влияния крупномасштабной шероховатости земной поверхности при дистанционных СВЧ радиометрических измерениях.

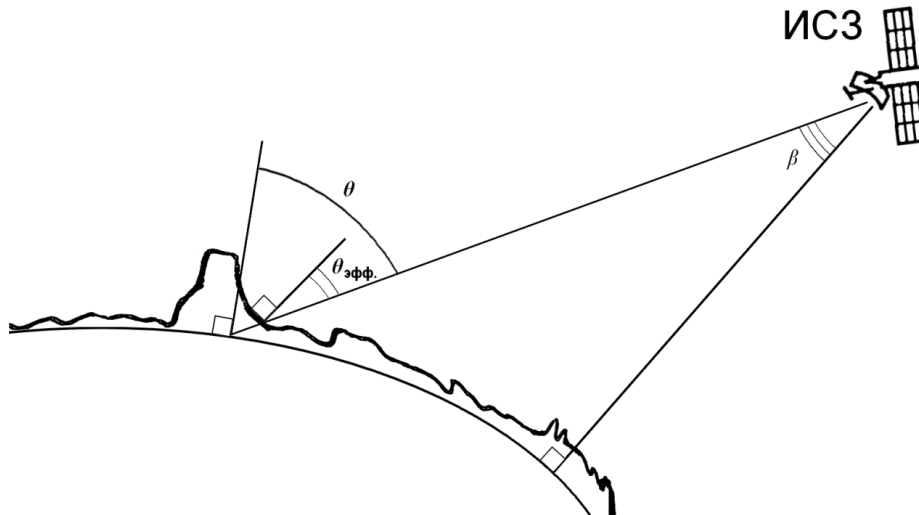


Рисунок 20 – Схема визирования для СВЧ сканеров, установленных на ИСЗ (β – надирный угол, θ – угол визирования, $\theta_{\text{эфф}}$ – эффективный (локальный) угол визирования)

В рамках разрабатываемого подхода «глобальная» система координат определяется координатами плоскости XOY , касательной к поверхности эллипсоида Земли в точке пересечения ее с визирующим лучом (осью диаграммы направленности антенны), и координатами прямой, по которой XOY пересекается с плоскостью меридиана. Положение визирующего луча в «глобальной» системе координат задается углами α и β , при этом геометрия визирования для произвольной ориентации плоскости элементарной площадки Ω соответствует показанной на рисунке 21.

Углы, задающие ориентацию элементарной площадки, соотносятся с ее уклоном slope и экспозицией aspect как $\mu = \pm \text{slope}$, $\gamma = \pm \text{aspect}$ (знаки зависят от направления отсчета углов,

задающих уклон и экспозицию). Отсчет экспозиции *aspect* ведется от меридионального направления на север, совпадающего с осью y , вокруг оси z по часовой стрелке. Отсчет уклона *slope* ведется от XOY вокруг прямой пересечения XOY и Ω также по часовой стрелке (вокруг оси x при нулевой экспозиции). Это соответствует классическому определению названных параметров в географических науках. Используемые далее матрицы преобразований координат задают повороты вокруг осей x и z согласно правилу «правой руки», принятому в математике. Поэтому $\mu = -slope$, $\gamma = -aspect$.

Для определения искомого эффективного угла визирования $\theta_{эфф}$ использованы трехмерные преобразования координат точек, задающих положение визирующего луча и плоскости элементарной площадки в пространстве [28].

В качестве исходной плоскости для преобразований выбрана плоскость XOY .

Поворот вокруг оси x задается матрицей:

$$[T_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mu & \sin \mu \\ 0 & -\sin \mu & \cos \mu \end{bmatrix}.$$

Поворот вокруг оси y задается матрицей:

$$[T_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Поворот вокруг оси z задается матрицей:

$$[T_3] = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Результирующая матрица поворота:

$$\begin{aligned} [T] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mu & \sin \mu \\ 0 & -\sin \mu & \cos \mu \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\cos \mu \sin \gamma & \cos \mu \cos \gamma & \sin \mu \\ \sin \mu \sin \gamma & -\sin \mu \cos \gamma & \cos \mu \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

$$B = \sin \mu \cos \gamma;$$

$$C = -\cos \mu;$$

$D = 0$, т.к. плоскость проходит через начало координат.

Угол между плоскостью, характеризующей элементарную площадку в пределах мгновенной области обзора СВЧ радиометра AMSR-E, и визирующим лучом вычисляется по формуле

$$\varphi_{\text{эфф}} = \arcsin\left(\frac{|Am + Bn + Cp|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} * \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}\right). \quad (21)$$

Таким образом, искомый эффективный угол визирования $\theta_{\text{эфф}} = 90^\circ - \varphi_{\text{эфф}}$ (поскольку угол $\theta_{\text{эфф}}$ отсчитывается от нормали к элементарной площадке):

$$\theta_{\text{эфф}} = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{|(-\sin \mu \sin \gamma)m + (\sin \mu \cos \gamma)n + (-\cos \mu)p|}{\sqrt{(-\sin \mu \sin \gamma)^2 + (\sin \mu \cos \gamma)^2 + (-\cos \mu)^2} * \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}\right), \quad (22)$$

где m , n и p – координаты направляющего вектора визирующего луча.

Помимо изменения угла визирования, на границах слоев многослойной среды происходит условное вращение плоскостей вертикальной и горизонтальной поляризации.

Для вычисления угла поворота плоскостей поляризации необходимо определить координаты прямой, перпендикулярной проекции визирующего луча на XOY .

Точки, принадлежащие проекции визирующего луча l_1 :

$$[0 \ 0 \ 0], [m \ n \ 0].$$

Матрица поворота на 90° в плоскости XOY :

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Координаты x и y для точки, принадлежащей прямой l_2 , перпендикулярной проекции визирующего луча:

$$[m \ n] * T_2 = [-n \ m].$$

Следовательно, плоскость V , проходящая через ось z и содержащая прямую l_2 , задается в пространстве тремя точками:

$$[0 \ 0 \ 0], [-n \ m \ 0], [0 \ 0 \ 1].$$

Уравнение плоскости V , заданной тремя точками, находится по формуле:

$$\begin{vmatrix} x & -n & 0 \\ y & m & 0 \\ z & 0 & 1 \end{vmatrix} = m * x + n * y = 0.$$

Следовательно, коэффициенты уравнения плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$ равны:

$$A = m;$$

$$B = n;$$

$C = 0$, т.к. плоскость проходит через ось z ;

$D = 0$, т.к. плоскость проходит через начало координат.

Прямая l_3 , по которой пересекаются плоскости V и Ω , задается системой уравнений этих плоскостей:

$$\begin{cases} (-\sin \mu \sin \gamma) * x + (\sin \mu \cos \gamma) * y + (-\cos \mu) * z = 0 \\ m * x + n * y = 0 \end{cases} . \quad (23)$$

Направляющий вектор прямой l_3 находится через векторное произведение нормалей к рассматриваемым плоскостям:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ m & n & 0 \\ -\sin \mu \sin \gamma & \sin \mu \cos \gamma & -\cos \mu \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & n \\ 0 & 0 & -m \\ -n & m & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -\sin \mu \sin \gamma \\ \sin \mu \cos \gamma \\ -\cos \mu \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -n \cos \mu \\ m \cos \mu \\ m \sin \mu \cos \gamma + n \sin \mu \sin \gamma \end{bmatrix} . \end{aligned}$$

Угол ξ между прямыми l_2 и l_3 , равный углу поворота плоскостей поляризации, определяется по формуле:

$$\xi = \pm \arccos\left(\frac{|(m^2 + n^2) \cos \mu|}{\sqrt{m^2 + n^2} \sqrt{m^2 \cos^2 \mu + n^2 \cos^2 \mu + (m \sin \mu \cos \gamma + n \sin \mu \sin \gamma)^2}}\right). \quad (24)$$

Стоит отметить, что полученные формулы описывают поведение specularной составляющей собственного СВЧ излучения природных сред участков суши в направлении антенны сенсора и неприменимы для оценки диффузной составляющей.

Предлагаемая методика учета влияния крупномасштабной шероховатости земной поверхности на ее излучательные свойства при дистанционных СВЧ радиометрических измерениях основана на использовании цифровых моделей рельефа (ЦМР) SRTM30 [131]. Методика позволяет количественно оценить изменения геометрии зондирования с помощью разработанного подхода к определению геометрии визирования.

Задача учета влияния макрорельефа при восстановлении значений параметров природных сред по данным СВЧ радиометрии и моделировании СВЧ излучательных свойств подстилающей поверхности для произвольного участка суши и выбранной орбиты ИСЗ в соответствии с предлагаемой методикой решается в ходе последовательности 3 шагов:

- 1) Расчет углов, характеризующих уклон *slope* и экспозицию *aspect* элементарных площадок в пределах мгновенных областей обзора СВЧ радиометра;
- 2) Определение эффективных углов визирования $\theta_{эфф}$ и углов вращения плоскостей поляризации ξ для каждой элементарной площадки;
- 3) Вычисление скорректированных значений коэффициентов отражения на границах раздела между слоями многослойных сред («грунт-снег-атмосфера» и т.д.), коэффициентов ослабления радиоизлучения для элементарных площадок.

Значения уклона и экспозиции рассчитываются по данным ЦМР для элементарных площадок, соответствующих 9 пикселям (элементам разрешения) ЦМР. Результирующие коэффициенты отражения на границах среды переводятся из локальной в глобальную систему координат с помощью выражений:

$$r_v = r_{vl} \cos^2 \xi + r_{hl} \sin^2 \xi, \quad (25)$$

$$r_h = r_{vl} \sin^2 \xi + r_{hl} \cos^2 \xi, \quad (26)$$

где r_{vl} , r_{hl} – коэффициенты отражения в локальной системе координат на вертикальной и горизонтальной поляризации соответственно, r_v , r_h – коэффициенты отражения в глобальной системе координат.

Координаты двух точек, принадлежащих визирующему лучу, при расчетах $\theta_{эфф}$ и ξ принимаются равными $[0 \ 0 \ 0]$, $[m \ n \ p]$. При самолетных СВЧ радиометрических измерениях в качестве координат точек на визирующем луче используются координаты авиаплатформы и координаты центра мгновенной области обзора сенсора. При спутниковых измерениях, в частности, с применением СВЧ радиометров AMSR-E (ИСЗ Aqua) и AMSR-2 (ИСЗ JCOM-W), координаты направляющего вектора визирующего угла вычисляются следующим образом. При угле визирования 55° и единичной длине отрезка, соединяющего точки $[0 \ 0 \ 0]$ и $[m \ n \ p]$, можно считать $p = 0,57$, следовательно, для восходящего витка орбиты ИСЗ Aqua ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$)

$$n = -\sqrt{\frac{0,6751 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha - 90^\circ)}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha - 90^\circ)}}, \quad (27)$$

$$m = \sqrt{0,6751 - \frac{0,6751 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha - 90^\circ)}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha - 90^\circ)}}, \quad (28)$$

для нисходящего витка орбиты ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)

$$n = \sqrt{\frac{0,6751}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}, \quad (29)$$

$$m = \sqrt{0,6751 - \frac{0,6751}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}. \quad (30)$$

Значения α для конкретных мгновенных областей обзора сенсора, необходимые для выполнения расчетов, могут быть импортированы из файлов данных СВЧ радиометрии уровня L2A – калиброванных отсчетах радиояркостной температуры с присоединенной информацией о геопривязке и параметрах орбиты ИСЗ.

2.5 Валидация модели собственного СВЧ излучения многослойной среды

В ходе валидации модели собственного СВЧ излучения многослойной среды выполнена оценка ее пригодности для описания реального поведения РЯТ на участках суши в Арктике, фиксируемого спутниковым СВЧ радиометром. Валидация включала в себя следующие основные этапы:

1. Создание алгоритма и кода программы расчета РЯТ многослойной среды в среде MatLab согласно разработанному модельному описанию;
2. Подготовка файлов с данными контактных измерений с ГМС и ГКС и дополнительной опорной информацией;
3. Проведение численных экспериментов по имитации годового хода РЯТ многослойной среды на тестовых участках У1-У3 на $f = 6,9$ ГГц для периодов А и В 2005-2008 гг.
4. Сопоставление результатов расчетов РЯТ с данными спутниковых измерений с СВЧ радиометра AMSR-E, оценка их согласия и формирование рекомендаций по дальнейшему использованию разработанной модели.

В первую очередь отдельно был испытан фрагмент модели, отвечающий за определение геометрии визирования при учете влияния макрорельефа на СВЧ излучательные свойства поверхности суши. Были выполнены численные эксперименты по определению зависимости эффективного угла визирования $\theta_{\text{эфф}}$ и угла поворота плоскостей поляризации ζ на типичном восходящем витке ИСЗ Aqua от уклона и экспозиции условной элементарной площадки земной поверхности для участка У3. В этом случае визирующий луч отклоняется от надира на 55° , а его проекция находится под углом $\sim 140^\circ$ к направлению на север, т.е. $\theta = 55^\circ$, $\alpha \approx 140^\circ$. Координаты точек, принадлежащих визирующему лучу, можно принять равными: $[0 \ 0 \ 0]$, $[0,53 \ -0,63 \ 0,57]$. Отсюда коэффициенты канонического уравнение прямой, которой принадлежит визирующий луч, равны: $m=0,53$, $n=-0,63$, $p=0,57$.

Согласно результатам расчетов, представленным на рисунке 22, на восходящем витке орбиты ИСЗ Aqua максимальный поворот плоскостей поляризации наблюдается при экспозиции склона в направлении, перпендикулярном к проекции визирующего луча на условную горизонтальную плоскость, и максимальном уклоне. В случае экспозиции склона в направлении визирующего луча вращение плоскостей поляризации не фиксируется. Значения эффективного угла визирования $\theta_{эфф}$ максимально отклоняются от исходного угла визирования в глобальной системе координат, равного 55° , при экспозиции склонов в направлении, совпадающем с проекцией визирующего луча на условную горизонтальную плоскость.

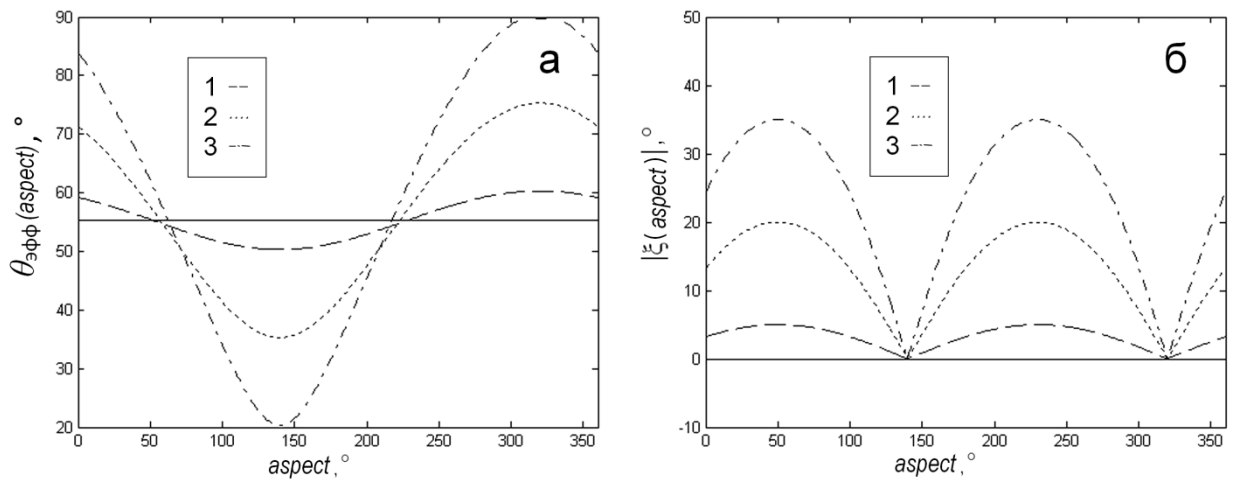


Рисунок 22 – Изменение локального угла визирования $\theta_{эфф}$ и модуля угла поворота плоскостей поляризации ξ при изменении экспозиции склона $aspect$ для тестового участка УЗ при разных значениях уклона элементарной площадки $slope$ (1 – 5° , 2 – 20° , 3 – 35°)

Расчет эффективных углов визирования для всей площади тестового участка позволил построить карту пространственного распределения эффективных углов визирования (рисунок 23, а). Как видно из представленного изображения, $\theta_{эфф}$ в пределах полигона меняется от $29,8^\circ$ до $85,5^\circ$ при изменении высот H от 0 до 527 м (рисунок 23, б). Среднее значение $\theta_{эфф}$ равно $54,2^\circ$ при СКО = $6,6^\circ$. Рассчитанные значения модуля ξ при этом попадают в диапазон $0 - 29,7^\circ$ (среднее значение равно $4,4^\circ$, СКО = $4,9^\circ$).

Оценка корреляции между высотой H и $\theta_{эфф}$ выполнена для трансекта 1-2, параллельного проекции визирующего луча, т.к. для данного направления ожидается наибольшая степень согласованности изменений этих двух параметров. Изменчивость $\theta_{эфф}$ вдоль трансекта адекватно отражает вариации высотных отметок: при визировании в направлении от точки 2 к точке 1 $\theta_{эфф}$ уменьшается на обращенных к СВЧ радиометру склонах и увеличивается на противоположных им (рисунок 24, а). Этим обусловлен и характер связи между H и $\theta_{эфф}$:

данные параметры слабо коррелированы между собой при нулевом относительном сдвиге, однако при отрицательном сдвиге ряда H на 2-3 ширины элементарной площадки наблюдается максимум взаимной корреляционной функции CCF. В ходе дополнительных вычислений было установлено, что полученные результаты расчета $\theta_{эфф}$ полностью согласуются с результатами расчетов, выполненных с помощью традиционного подхода [99], при условии преобразований системы координат в последнем случае. Это подтверждает работоспособность предлагаемого подхода к определению геометрии визирования.

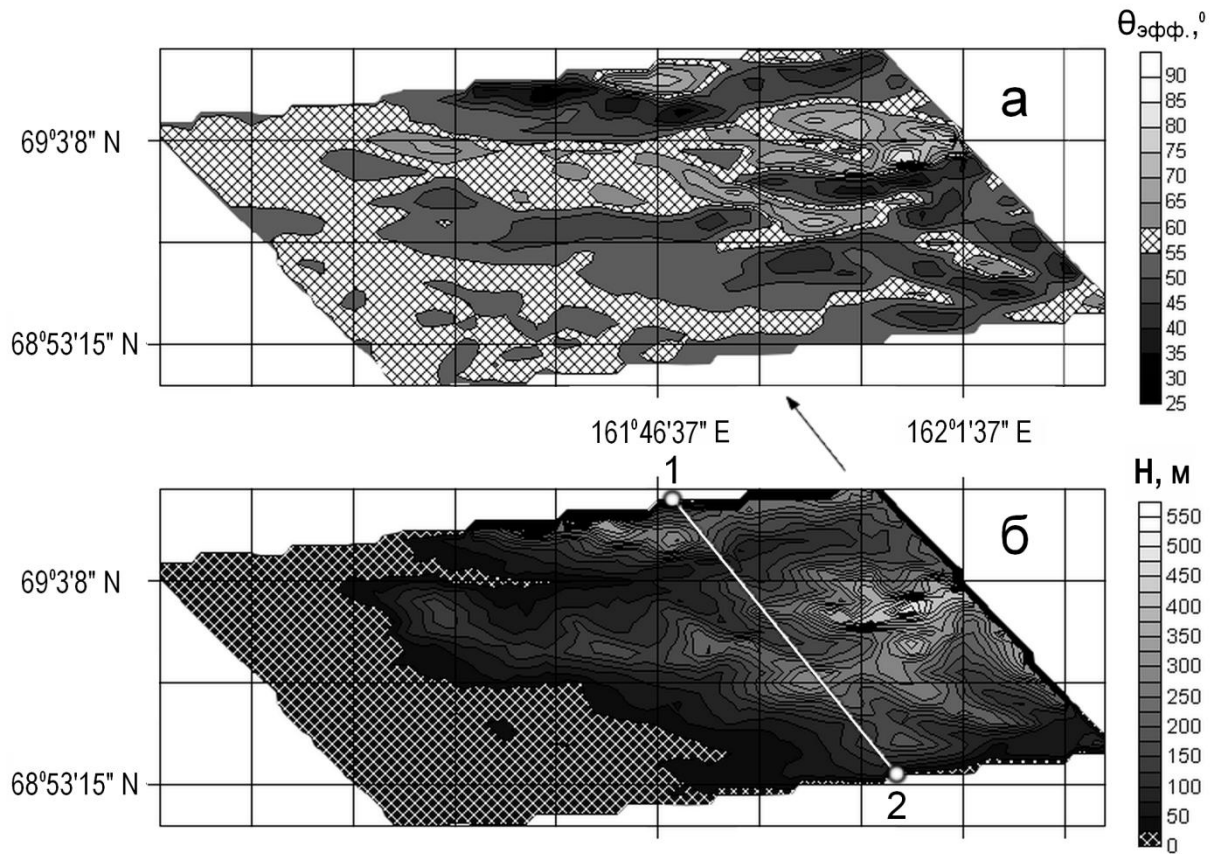


Рисунок 23 – Карта распределения эффективных углов визирования $\theta_{эфф}$ в пределах тестового участка У3 для СВЧ радиометра AMSR-E на восходящем витке ИСЗ Aqua (а) и карта высот H по данным ЦМР SRTM30 (б); стрелкой обозначена проекция визирующего луча, 1-2 – трансект для оценки корреляции между H и $\theta_{эфф}$

Таким образом, работоспособность предложенного подхода к определению геометрии визирования была подтверждена в ходе апробации на тестовом участке У3. Полученные в разделе 2.4.3 аналитические выражения обеспечивают возможность расчета значений эффективного угла визирования и угла поворота плоскости поляризации по координатам точек на визирующем луче, что делает подход одинаково применимым для спутниковых и авиационных СВЧ измерений и позволяет сократить объем вспомогательных расчетов.

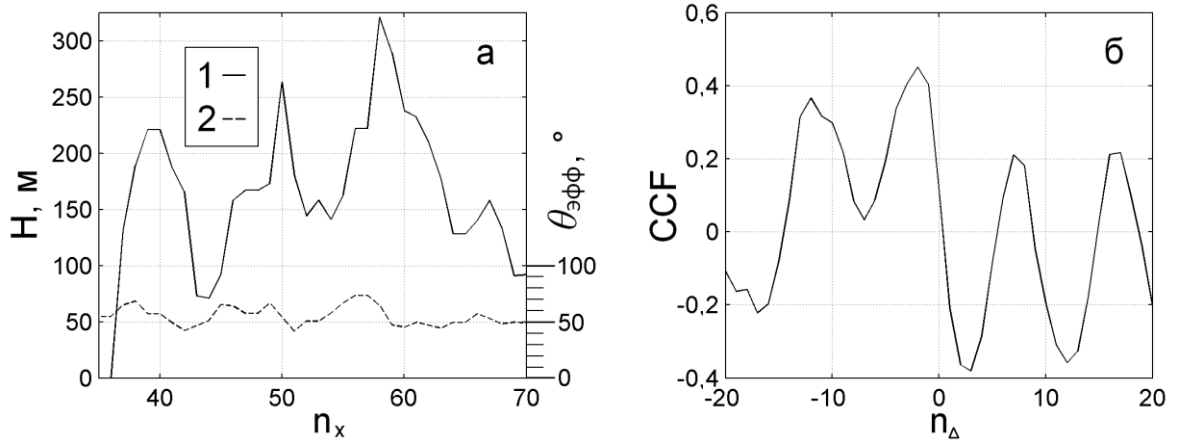


Рисунок 24 - Изменчивость высоты H и эффективного угла визирования $\theta_{\text{эфф}}$ вдоль обозначенного на рисунке 23 трансекта 1-2 (а) и полученная для него взаимная корреляционная функция H и $\theta_{\text{эфф}}$ CCF (б); 1 – H , 2 – $\theta_{\text{эфф}}$, n_x – порядковый номер элементарной площадки (при отсчете в направлении от точки 1 к 2), n_d – относительный сдвиг рядов H и $\theta_{\text{эфф}}$

При выполнении численных экспериментов по имитации годового хода РЯТ на вход созданной программы подавались данные подспутниковых контактных измерений с ГКС и ГМС, расположенных рядом с участками: ряды ежедневных значений $T_{\text{ср}}$ на глубине 2 см и температуры приземного слоя воздуха $T_{\text{возд}}$, информация об осадках и толщине снежного покрова. В интерактивном режиме устанавливались значения максимальной объемной влажности грунта в талом состоянии на глубине 2 см, плотности снежного покрова, задавался тип гранулометрического состава.

Наилучшее соответствие между данными измерений и расчетов для участка У1 зафиксировано при выборе в качестве нижнего слоя модели грунта, близкого по гранулометрическому составу к супеси, с максимальной объемной влажностью 13% (результат расчета для 2008 г. показан на рисунке 25). Значение порогового содержания связанной влаги в грунте было априорно установлено на уровне 7%. Усредненные параметры грунтовых слоев на участке У2 отличаются от восстановленных для территории на п-ове Ямал. Соответствие расчетных значений РЯТ измеренным в случае У2 достигается снижением максимальной влажности грунта до 10% при сохранении гранулометрического состава, соответствующего супеси. Альтернативный вариант получения тех же модельных значений РЯТ для данного участка заключается в изменении содержания связанной влаги при сохранении исходного уровня влажности за счет появления в составе грунта более мелких частиц, что также возможно в условиях наблюдаемой на практике пространственной неоднородности характеристик грунтов. Для участка У3 наилучшее соответствие между модельными и измеренными РЯТ достигнуто при выборе гранулометрического состава, близкого к суглинку, и максимальной влажности 14%.

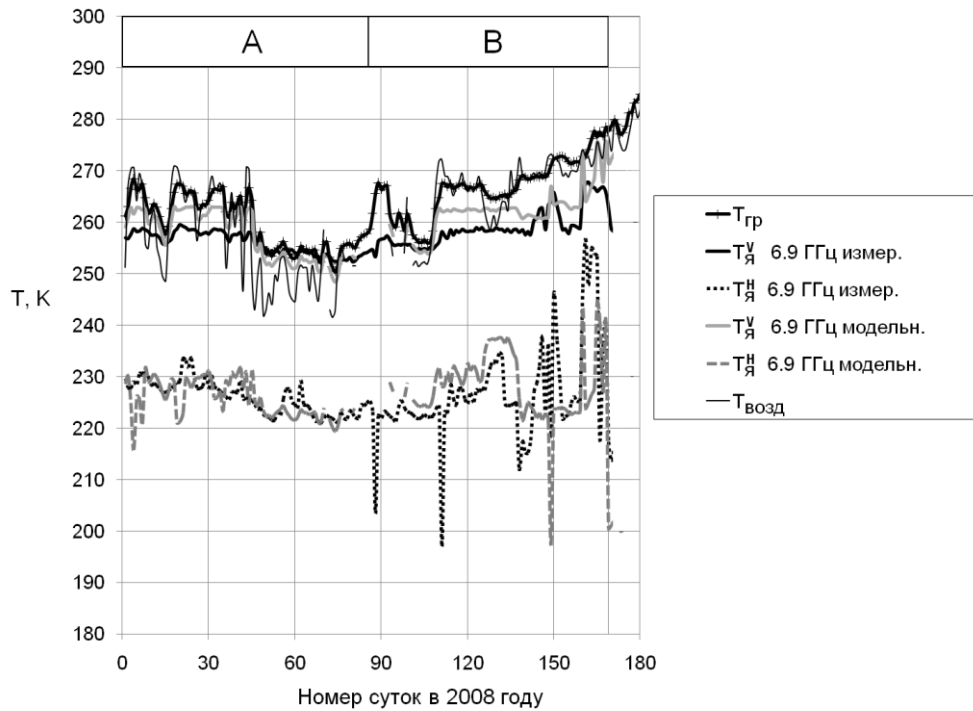


Рисунок 25 – Временная изменчивость РЯТ для участка У1 в периоды А и В 2008 года по данным спутниковых СВЧ измерений (AMSR-E, Aqua, $f = 6,9$ ГГц) и по результатам моделирования, ход $T_{гр}$ и $T_{возд}$ на площадках ГКС и ГМС Марре-Сале

Ниже приведен подробный анализ результатов моделирования для участка У1 в 2008 г. Усредненные значения модуля разности между расчетными (РЯТ_р) и измеренными (РЯТ_и) РЯТ для У1 в периоды А-Д 2008 года приведены в таблице 14. Как можно заметить, в период А расхождение между расчетными и измеренными значениями минимально и составляет при горизонтальной поляризации сигнала не более 2,6 К. Модельные и измеренные РЯТ в этот период изменяются синфазно, незначительно отличается глубина колебаний радиояростной температуры. При понижении $T_{гр}$ до значений 250-255 К практически вся влага, содержащаяся в грунте, переходит в твердое состояние. Это обуславливает высокие величины коэффициентов излучения в феврале-марте (РЯТ(V) практически равна $T_{гр}$), когда фиксируется минимум термодинамической температуры грунтов. Корреляция между измеренными и расчетными значениями РЯТ в зимние месяцы достигает 0,97 при вертикальной поляризации сигнала, коэффициент корреляции между $T_{гр}$ и РЯТ_и принимает значение 0,89.

Таблица 14 – Расхождение между расчетными РЯТ_p и измеренными $\text{РЯТ}_и$ значениями РЯТ для участка У1 в 2008 г., соотнесенное со среднеквадратичным отклонением (СКО) $\text{РЯТ}_и$ для периодов 2008 г.

Поляризация	Среднее значение модуля разности $ \text{РЯТ}_p - \text{РЯТ}_и _{\text{ср}}$ для периода, К		СКО для ряда $\text{РЯТ}_и$ в период, К	
	Период 2008 г.		Период 2008 г.	
	А	В	А	В
V	2,7	5,0	2,0	3,5
H	2,6	9,6	3,3	10,8

Оттепели в период с 140 по 160 день, зафиксированные по спутниковым СВЧ данным, нашли отражение и в модельных значениях РЯТ. Им соответствует существенное падение РЯТ на горизонтальной поляризации сигнала, предположительно связанное с появлением на поверхности снежного покрова и грунта большого количества жидкой влаги вследствие выпадения осадков и таяния. Имевшее место на 87 сутки резкое уменьшение РЯТ, отмеченное в ряду спутниковых измерений, не проявилось в результатах моделирования, поскольку в эту дату отсутствовали данные по температуре воздуха с площадки ГМС. При вертикальной поляризации сигнала зафиксирована разница в поведении расчетных и измеренных значений РЯТ: в первом случае наблюдается некоторый рост РЯТ, по мнению автора, связанный с заданием в модели угла визирования в весенний период, равного 55° , близкого к углу Брюстера для границы «воздух - влажный снег». Во втором случае, напротив, происходит некоторое снижение РЯТ. Анализ спутниковых данных показал, что увеличение $\text{РЯТ}(V)$ при оттепелях может наблюдаться на частотах 18-36 ГГц. Этот эффект описан в [100, 127]. Выявить причину отмеченного несоответствия между измеренными и рассчитанными РЯТ, по мнению автора, позволит дальнейшее исследование эффектов объемного рассеяния в снежной толще и угла Брюстера для талого снежного покрова [87, 127].

Корреляция между термодинамическими и радиояркостными температурами в период В годового цикла ожидаемо снижена, коэффициент корреляции между T_{gp} и РЯТ при горизонтальной поляризации принимает значения, либо близкие к нулю ($r = 0,1-0,3$), либо отрицательные, как для модельных, так и для измеренных данных. Это может быть связано с тем, что весной колебания T_{gp} происходят вблизи отметки 273 К, и повышение T_{gp} во многие дни вызывает увеличение содержания жидкой влаги в грунте, что отражается в уменьшении РЯТ (наиболее выраженном на горизонтальной поляризации). Наблюдаются существенные расхождения между измеренными и расчетными значениями РЯТ в июне, когда T_{gp} превысила порог 273 К и в последующие дни уже не принимала значений ниже этой отметки, а на поверхности грунта присутствовал снежный покров. Температура воздуха на рассматриваемом отрезке времени, напротив, колебалась на уровне 270-273 К. В алгоритм решения прямой

задачи ДЗЗ было заложено условие, согласно которому в весенний период переход температуры воздуха через отметку 273 К воспринимается как указание на повышенную влажность снега. Следовательно, в рассматриваемый временной интервал грунт в модельных расчетах оказался талым, а снежный покров – сухим. Предположительно, в реальных условиях при небольшой толщине снежного покрова, имевшей место в июне, отепляющее влияние талого грунта вызвало оттаивание нижних слоев снега. В таких условиях КДП снежного покрова принимает значения, при которых РЯТ может существенно увеличиться [87, 127]. Этим можно объяснить повышение уровня измеренных РЯТ в конце периода таяния снега. После схода последнего (в середине июня) и расчетные, и измеренные РЯТ резко уменьшаются.

Несмотря на небольшие значения уклонов, наблюдаемые в пределах тестовых участков У1, У2 и У3 (рисунок 26), учет влияния макрорельефа земной поверхности был выполнен для каждого из них. Результаты расчетов показали, что коррекция коэффициентов Френеля и удельного ослабления в слоях модели с учетом влияния макрорельефа обеспечивает увеличение согласия между результатами моделирования РЯТ и данными измерений прежде всего для участка У3 и не играет значимой роли для участков У1 и У2 вследствие малых величин уклона элементарных площадок в их пределах. В то же время, такая коррекция не позволяет сократить разницу между модельными и измеренными значениями РЯТ до минимума (в период А в отдельные даты она может составлять 5-10 К).

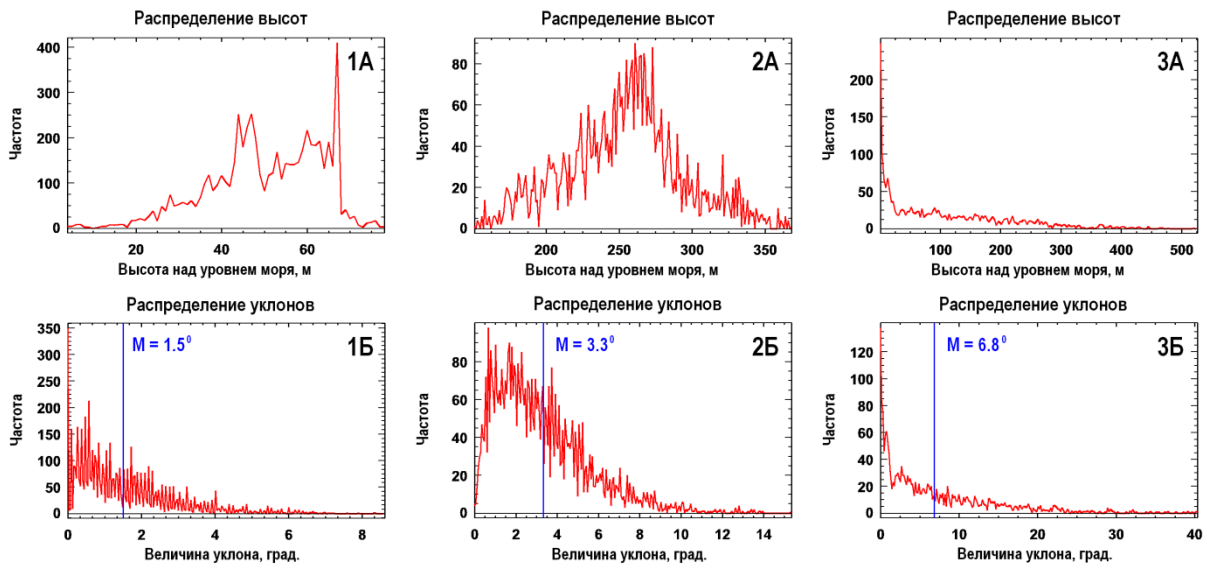


Рисунок 26 – Гистограммы распределения высот (А) и уклонов (Б) подстилающей поверхности в пределах тестовых тундровых участков У1 (1), У2 (2) и У3 (3), рассчитанные на основе цифровой модели рельефа SRTM30 (включая водную поверхность). M – математическое ожидание для рядов значений уклонов

Полученные результаты показывают, что модель может быть использована для описания изменчивости СВЧ излучательных свойств многослойной среды «грунт-снег-атмосфера» в периоды А и В годового цикла. Однако требуется дополнительный учет изменений диэлектрических свойств снежного покрова, связанных с процессами его метаморфизма.

2.6 Выводы по разделу

На основе сформулированных в разделе 1 требований разработан метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по спутниковым СВЧ радиометрическим данным.

Выбраны каналы распространения спутниковых данных, а также источники опорной информации о состоянии грунтов и сопряженных с ними сред, необходимой для валидации моделей и программно-алгоритмического обеспечения. Обнаружено, что оптимальным с точки зрения затрат временных и вычислительных ресурсов на оперативную обработку СВЧ данных в целях мониторинга мерзлых грунтов Арктики является использование калиброванных данных уровня L3, представленных в виде суточных мозаик распределения РЯТ в пределах полушария.

Для первичного анализа данных спутниковых и наземных измерений и валидации разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения в разных климатических, геокриологических и геоморфологических условиях выбрано три тестовых полигонных участка, расположенных в «ключевых» для мониторинга мерзлых грунтов районах евразийского сектора Арктики: на северо-востоке ЕТР, севере ЗС и северо-востоке ВС, вблизи от действующих ГКС и ГМС, являющихся поставщиками опорных данных контактных измерений.

Проведенный для тестовых участков комплексный анализ рядов спутниковых и контактных измерений за 2005-2008 гг. позволил выявить характерные особенности временной изменчивости РЯТ и исследовать связь изменений РЯТ с вариациями $T_{гр}$ и $T_{возд}$, выпадением осадков. По данным спутниковых СВЧ радиометрических измерений на $f = 6,9$ ГГц в годовом цикле внутригодовой изменчивости состояния грунтов выделено четыре периода, не совпадающих с традиционными сезонами.

По результатам комплексного анализа данных в качестве индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов определены производные показатели, напрямую и косвенно связанные с основным параметром состояния мерзлых грунтов – термодинамической температурой. Выбраны подходы к определению значений индикаторов изменчивости.

Для восстановления среднесуточных значений T_{gr} по данным спутниковой СВЧ радиометрии предложено использовать модель собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера». В модели, разработанной автором на основе модели ГГО им. А.И. Воейкова, реализован новый подход к определению геометрии визирования при учете влияния макрорельефа поверхности суши на СВЧ излучательные свойства среды. Разработан математический аппарат для вычисления эффективных углов визирования и углов поворота плоскостей поляризации на основе данных ЦМР и координат визирующего луча для конкретной мгновенной области обзора СВЧ радиометра. Валидация модели проведена для участков У1-У3 на материале архива данных СВЧ радиометра AMSR-E за 2005-2008 гг. Результаты тестовых испытаний показали применимость модели для описания изменчивости СВЧ излучательных свойств многослойной среды «грунт-снег-атмосфера» в периоды А и В годового цикла.

3 Разработка программно-алгоритмического и методического обеспечения для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики

3.1 Алгоритм оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии

3.1.1 Обобщенная структура алгоритма

Разработанный алгоритм оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по СВЧ радиометрическим данным состоит из четырех основных блоков (рисунок 27).



Рисунок 27 – Обобщенная структура алгоритма оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии

Блок ввода-вывода и предварительной обработки входных данных отвечает за считывание оперативных спутниковых данных и опорных данных из внешних файлов и их предварительную обработку и вывод результатов расчетов. Выбранные подходы к

определению значений индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов во внутригодовом масштабе (*И1с-И3с*) реализованы в блоке распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов и блоке восстановления значений T_{sp} . Блок расчета значений индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов задает последовательность операций, необходимых для определения значений индикаторов *И1г-И3г*.

Далее в соответствующих разделах подробно описаны блоки распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов и восстановления значений T_{sp} .

3.1.2 Блок распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии

Как было показано в разделе 2.3, распознавание границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным при использовании двух частот СВЧ радиометра может осуществляться с применением двух подходов, значительно отличающихся друг от друга по принципу обнаружения границ. Выбор наиболее эффективного подхода для конкретных границ выполнен автором в ходе создания двух конкурирующих версий соответствующего алгоритмического блока. Версии обозначены следующим буквенными индексами: α – версия, в которой распознавание границ периодов осуществляется по данным одноканальных измерений на $f = 6,9$ ГГц, β – версия, в которой используются двухканальные измерения на $f = 6,9$ ГГц и 36,5 ГГц. Схемы версий алгоритмического блока приведены на рисунке 28.

Отметим, что в версии α все границы распознаются с помощью первого подхода к определению границ (по значениям СКО выборок, выделяемых «скользящим» окном из годовых рядов РЯТ). В случае версии β используется как этот подход, так и подход, основанный на вычислении значений спектрального градиента между каналами 36,5 ГГц и 6,9 ГГц, так как возможность распознавания границы В|С по спектральному градиенту не была выявлена в ходе визуального анализа тестовых выборок спутниковых данных за 2005-2008 гг.

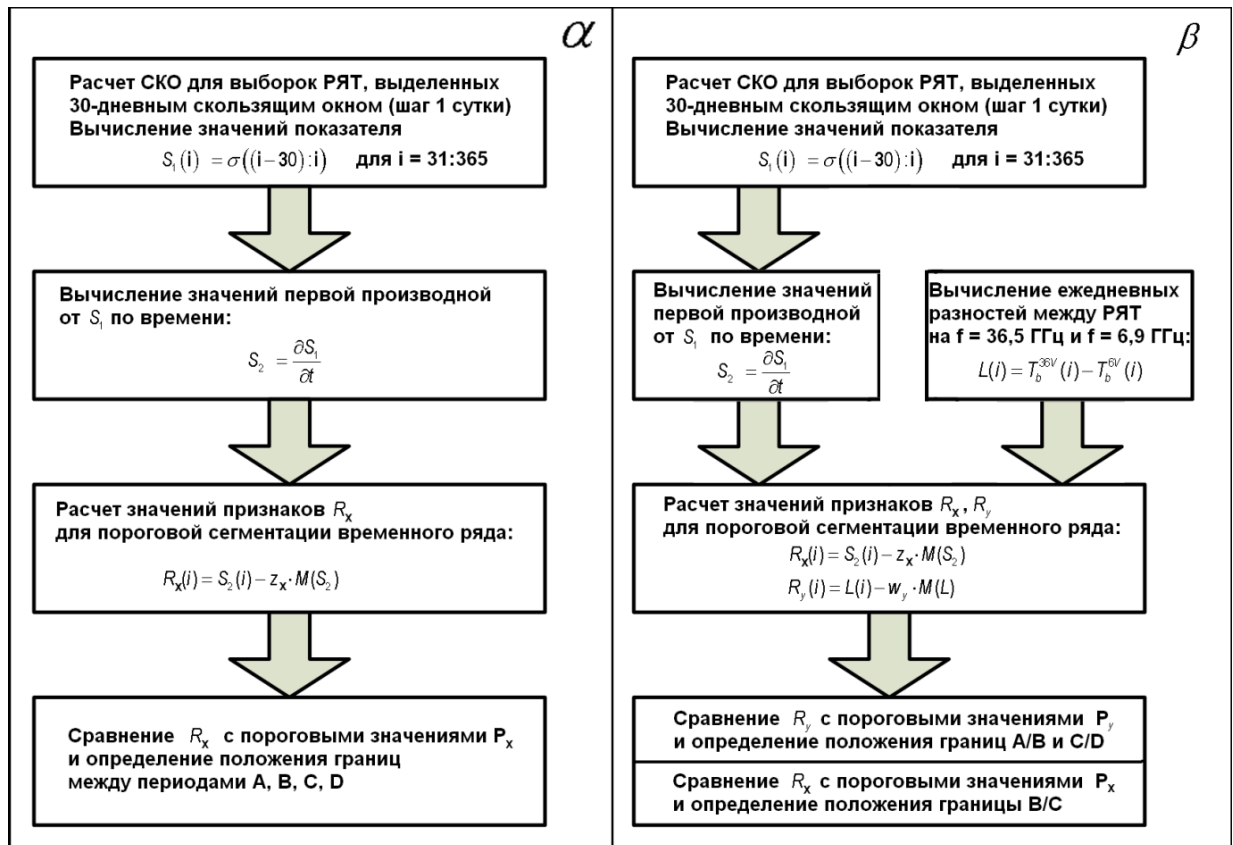


Рисунок 28 – Обобщенные структуры версий α и β алгоритмического блока для распознавания границ внутригодовой изменчивости состояния грунтов

Значения σ в обеих версиях блока рассчитываются для 30-дневных выборок РЯТ, выделяемых «скользящим окном» из полного годового ряда. Такой размер выборки позволяет обеспечить баланс между чувствительностью к единичному отклонению РЯТ и защитой от ложных срабатываний детектора границ.

Для выявления наиболее значимых изменений σ рассчитывается первая производная от σ по времени (S_2). На основе S_2 вычисляются ежедневные значения дочерних признаков R_x , которые сравниваются с выбираемыми интерактивно (либо заранее установленными для конкретной географической области) порогами P с учетом эмпирических коэффициентов z . Исходя из результатов сравнения в автоматическом режиме принимаются решения об установлении положения границ между периодами (в большинстве случаев граница «привязывается» к первым по счету суткам, для которых выполняется конкретное неравенство). Другие подходы к использованию производных от параметров СВЧ излучения по времени для выявления периодов интенсивного таяния снежного покрова и грунтов описаны в [83, 101].

В случае двухканальной версии блока β в качестве основного базового информативного признака для распознавания границ А/В и С/D была выбрана разность РЯТ на $f = 36,5$ ГГц и $f = 6,9$ ГГц (обозначена как L). Определение положения границы В/С

производится по значениям одного из признаков R_x , вычисляемого таким же образом, как и в алгоритме α , поскольку используемый спектральный градиент не позволяет определить даты начала вегетационного периода.

Версия алгоритмического блока, позволяющая решать задачу распознавания границ периодов наиболее эффективно, была определена в ходе экспериментов на материале выборок РЯТ за 2005-2008 гг. для трех тестовых участков У1, У2, У3. В качестве критерия эффективности выбрана величина расхождения между полученным с помощью блока положением границ периодов и результатами визуального распознавания, подкрепленными опорной информацией (данными о $T_{возд}$ и осадках с ГМС). В качестве сопутствующей опорной информации привлечены спутниковые изображения видимого диапазона MODIS [113], необходимые для визуальной фиксации времени начала вегетационного сезона. Установлены следующие пороговые значения: $P_{AB} = -10$ для ЗС и ЕТР и $P_{AB} = -25$ – для ВС, $P_{CD} = -10$.

Результаты тестовых испытаний обобщены в таблице 15. Наибольшие трудности наблюдаются при автоматическом распознавании границ периодов для тестового участка, расположенного в Якутии, где положение границ А/В и С/Д верно определяется лишь в 50% случаев. Это обусловлено малой длительностью периода В, начало которого не отмечается значимым падением РЯТ, фиксируемым для участков на п-ове Ямал и вблизи ГМС Воркута. Данный факт, предположительно, связан с ярко выраженным континентальным климатом и существенной расчлененностью рельефа.

Таблица 15 – Результаты испытаний алгоритмов α и β при определении положения границ периодов годового цикла РЯТ для выборки 2005-2008 гг. (процент совпадений с опорными *in situ* и спутниковыми (MODIS) измерениями)

Алгоритм\Участок	У1 (Ямал)	У2 (Воркута)	У3 (Якутия)
α	66%	75%	58%
β	100%	92%	83%

Версия алгоритмического блока β , использующая для распознавания границ разность РЯТ на $f = 36,5$ ГГц и $f = 6,9$ ГГц и первую производную от стандартного отклонения в 30-дневных выборках РЯТ на $f = 6,9$ ГГц, показала большую эффективность распознавания в тестовых испытаниях. По результатам испытаний данная версия блока включена в состав алгоритма оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным.

3.1.3 Блок восстановления значений термодинамической температуры грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии

Алгоритмический блок восстановления значений T_{cp} создан на основе разработанной модели собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера». В блок входит подблок расчета КДП слоев; подблок учета влияния крупномасштабных неровностей земной поверхности на ее СВЧ излучательные свойства, подблок расчета результирующих РЯТ, подблок решения обратной задачи и оценки результатов восстановления значений T_{cp} .

Восстановление значений T_{cp} производится «попиксельно», то есть индивидуально для каждого участка суши, соответствующего элементу разрешения мозаики данных уровня L3 СВЧ радиометра. Помимо среднесуточных значений T_{cp} для периодов А и В (значений индикатора $I1c$), в данном алгоритмическом блоке восстанавливаются значения индикатора $I2c$. Последовательность операций и особенности выполнения каждой из них приведены ниже.

1. В соответствии с указанными пользователем пространственными и временными границами происходит прием входных данных для конкретного участка и временного интервала длиной в один или несколько календарных лет из блока ввода-вывода и предварительной обработки данных и блока распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов. Входными данными являются среднесуточные значения $T_{я}$, опорные данные с ближайших ГКС и ГМС (среднесуточные значения температуры поверхностного слоя грунта T_{cp} на глубине 2 см, среднесуточные значения температуры приземного воздуха $T_{возд}$ и значения толщины снежного покрова), значения абсолютных высотных отметок внутри выбранных пикселей согласно цифровой модели рельефа SRTM, информация о положении границ между периодами внутригодовой изменчивости состояния грунта А-В в виде значений индикатора $I3c$, данные о плотности грунтов для выбранных пикселей из [128] (рисунок 29). Все входные данные, кроме высотных отметок, организованы в виде трехмерного массива со следующими измерениями (координатами): порядковый номер пикселя в выборке, порядковый номер суток, индекс входного параметра.

2. По значениям разности $T_{я}$ на $f = 36,5$ ГГц и $f = 6,9$ ГГц на V-поляризации согласно [100] производится определение значения индикатора мерзлого/талого состояния грунта ($I2c$) для каждой даты календарного года. При этом учитывается условие, что в период А грунт может находиться только в мерзлом состоянии, в период В – как в мерзлом, так и в талом состоянии.

3. Исходя из плотности грунтов согласно [66] задается тип грунта по гранулометрическому составу: $0,1-1,0 \text{ г/см}^3$ – торф, $1,0-1,3 \text{ г/см}^3$ – глина, $1,3-1,5 \text{ г/см}^3$ – суглинок, $1,5-1,8 \text{ г/см}^3$ – песок (стоит отметить, что данные диапазоны соответствуют равновесному состоянию верхнего слоя грунтов и не совпадают с интервалами плотности, свойственными грунтам разного гранулометрического состава по ГОСТ [13]). С помощью описанных в разделе 2.4.2 выражений для расчета КДП грунта с учетом содержания связанной влаги на основе температурно-влажностных зависимостей из [62] для сопоставленного пикселю типа грунта выполняется вычисление значений действительной и мнимой частей КДП на $f = 6,9 \text{ ГГц}$. КДП рассчитывается в узлах с координатами $(T_{гр}, W_{max})$ нерегулярной сетки, в которой наибольшая густота узлов (точек) задана для интервала интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги. W_{max} – максимальная объемная влажность грунта (равна его влажности в талом состоянии при отсутствии обмена влагой с другими слоями многослойной среды). С помощью двумерной кусочной интерполяции восстанавливаются значения КДП грунта между узлами сетки. Пределы изменения $T_{гр}$ – от 230 до 320 К, W_{max} – от 0 до 100 %.

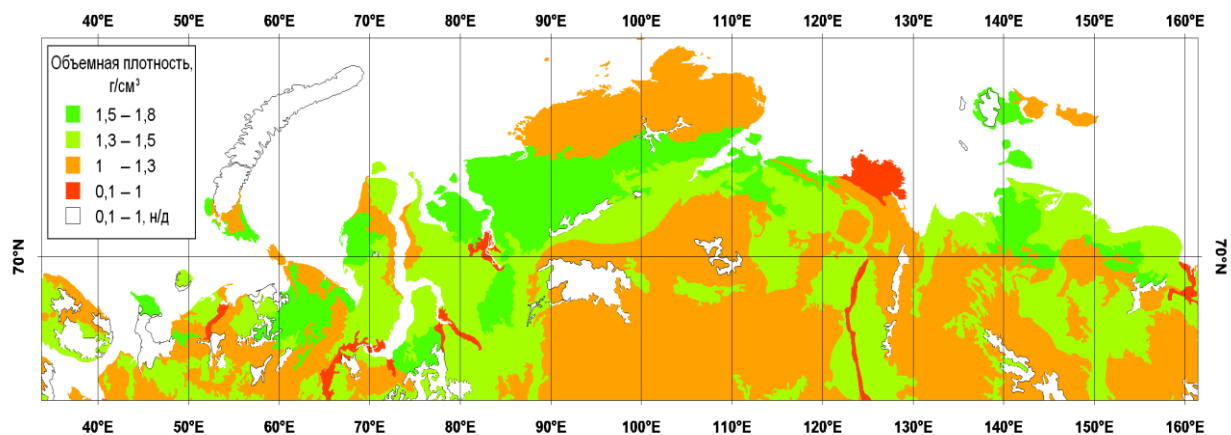


Рисунок 29 – Карта объемной плотности грунтов евразийского сектора Арктики, составленная автором по материалам [128]; н/д – нет данных

4. Рассчитываются среднесуточные значения КДП снежного покрова на $f = 6,9 \text{ ГГц}$. В первые сутки периода А значение КДП принимается равным значению для сухого снега с плотностью $0,3 \text{ г/см}^3$. Далее для каждых суток данного периода КДП вычисляется по эмпирическим формулам: $\varepsilon'_{снег} = 1,57 + 0,003 \cdot day$, $\varepsilon''_{снег} = 0,0002 + day \cdot 0,000002$, где day – номер суток. В период В значение КДП сухого и влажного снежного покрова задается как функция числа предшествующих дней с талым состоянием грунта, так как физические свойства снежного покрова в мерзлом и талом состоянии до и после первых оттепелей

существенно различаются [54]. При сумме числа дней с оттепелями менее четырех КДП влажного снежного покрова принимается равной КДП пленки воды на поверхности снега, при сумме таких дней, равной или превышающей четыре, КДП рассчитывается по формулам из раздела 2.4.2 для влажности снега 3-5%. Для сухого снежного покрова в качестве временного порога для изменения значения КДП является дата наступления второй оттепели. Расчет ведется по соответствующим формулам.

5. Рассчитываются среднесуточные значения толщины снежного покрова l_2 . В период А они принимаются равными значениям, измеренным с помощью снегомерных линеек на ближайшей к участку ГМС (полагается, что вследствие высокой радиопрозрачности сухого снега на $f = 6,9$ ГГц недоучет l_2 не оказывает существенного влияния на T_y). Для периода В значения l_2 между точками кривой годового хода А|В (l_2 равно значению с ГМС) и В|С ($l_2 = 0$) интерполируются с помощью полинома первой степени.

6. Для каждого суток производится расчет T_y на $f = 6,9$ ГГц, V- и H-поляризации для разных сочетаний T_{ep} и W_{max} (и соответствующих им значений КДП грунта) при установленных значениях l_2 , КДП снежного покрова, И2с. РЯТ грунта, представляемая в виде функции T_{ep} и W_{max} , вычисляется в соответствии с выражениями, приведенными в разделах 2.4.1, 2.4.3. При учете макрорельефа поверхности суши значения скорректированных коэффициентов Френеля и удельного поглощения слоев многослойной среды рассчитываются по высотным отметкам ЦМР для элементарных площадок в пределах пикселя и усредняются по его площади для экономии вычислительных ресурсов. При расчетах учитывается условие, согласно которому за одни сутки T_{ep} не может измениться больше, чем на 3 К, что соответствует результатам теплофизических расчетов при развитом снежном покрове [54]. Также пределы изменения T_{ep} зависят от значения индикатора мерзлого/талого состояния грунта. В первые сутки календарного года температура снега принимается равной T_{ep} в те же сутки. В последующие сутки производится коррекция температуры снега с учетом тепловой инерции снежного покрова. Коррекция осуществляется с помощью введения коэффициента запаздывания, значения которого прибавляются к значениям T_{ep} в предыдущие сутки. Этот коэффициент зависит от близости значений T_{ep} к 0 °С и может принимать положительные и отрицательные значения. По рассчитанным среднесуточным значениям T_y для каждого суток вычисляется значение параметра невязки Q :

$$Q = \sqrt{(T_{y(измер.)}^V - T_{y(мод.)}^V(T_{ep}, W))^2 + (T_{y(измер.)}^H - T_{y(мод.)}^H(T_{ep}, W))^2}, \quad (31)$$

где W – объемная влажность грунта, %, $T_{я(измер.)}$ – измеренные с ИСЗ $T_{я}$, $T_{я(мод.)}$ – модельные $T_{я}$, рассчитываемые с помощью модели собственного СВЧ излучения многослойной среды, верхние индексы V и H обозначают плоскость поляризации СВЧ излучения.

Далее для конкретных суток производится поиск минимума функционала Q в координатах $T_{сп} - W_{max}$. В разработанном алгоритме предусматривается выполнение поиска минимума с регулярным шагом 0,5 К по температуре и 5 % по объемной влажности. Значение $T_{сп}$ из сочетания $T_{сп} - W_{max}$, при котором наблюдается минимум Q , является решением задачи восстановления $T_{сп}$ по спутниковым СВЧ радиометрическим данным.

Отметим, что в рассмотренном алгоритмическом блоке реализованы основные новшества разработанного метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики: использование ретроспективных данных о состоянии грунтов для расчета КДП слоев среды и векторно-координатный подход к определению геометрии визирования.

3.2 Разработка программного обеспечения для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии

Глобальный и региональный аэрокосмический мониторинг природных сред предполагает работу с *большими массивами* спутниковых данных. В ходе разработки и использования метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики используются *разнородные* данные из широкого набора источников. Два указанных выше ключевых условия определяют основные требования к программному обеспечению (ПО), в котором реализуются предусмотренные разработанными алгоритмами вычислительные процедуры. В список требований к ПО вошли следующие пункты:

1. Необходимость работы с большими объемами данных требует существования возможности упрощенной организации пакетной обработки файлов.
2. Необходимость описания математических моделей и сложных алгоритмов обработки информации требует наличия в программном обеспечении развитого математического аппарата.
3. Поскольку данные, с которыми ведется работа, в большинстве случаев представляют собой геоданные, требуется поддержка форматов представления информации с геопривязкой.

4. Необходимость вывода данных анализа как в табличном, так и в графическом виде требует наличия развитой графической подсистемы ПО.
5. Кроме того, требуется реализация возможности оперативного усовершенствования ПО.
6. Немаловажную роль играет и простота освоения ПО пользователем без специальной подготовки в сфере информационных технологий.

Автором было решено разрабатывать ПО, удовлетворяющее обозначенным требованиям, в виде комплекса программ в программной среде. В качестве программной среды выбрана система MatLab. Она обеспечивает поддержку высокого уровня автоматизации процессов вычислений и предоставляет расширенные возможности работы с многомерными данными. Процесс создания приложений для проведения вычислительных экспериментов в данной среде предельно прост, скомпилированные приложения функционируют и на персональных компьютерах, на которых не установлена система MatLab. К недостаткам использования данной системы в качестве базы для реализации метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов является высокая стоимость лицензии и, как следствие, невозможность внедрения метода без дорогостоящего внедрения ПО MatLab. Тем не менее, эта система была выбрана основной для создания программ обработки данных.

Альтернативный вариант, рассмотренный в рамках настоящего исследования, представлен средой и языком программирования R. Язык R является диалектом языка S, который был разработан как удобный и эффективный инструмент для работы с данными, моделирования и визуализации. Стоит отметить развитый математический аппарат, поддерживаемый языком. R развивается в рамках open-source-проекта и распространяется бесплатно под лицензией GNU [130]. Это позволяет осуществлять быструю модернизацию программ и исключить дополнительные затраты, связанные с приобретением коммерческого лицензионного ПО. Обилие дополнительных пакетов, содержащих инструменты для работы с разнородными данными, в том числе с геопространственными, упрощает задачу написания программ на R. На R было продублировано около 30% программ обработки данных, в которых реализованы разработанные в предыдущем разделе алгоритмы. В перспективе планируется полный перевод программно-алгоритмического обеспечения метода на код, написанный на R, что существенно снизит стоимость его внедрения в практику мониторинга мерзлых грунтов Арктики.

Созданное на базе разработанного алгоритма оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики ПО представляет собой приложение для операционной системы

Windows в 32-х и 64-х разрядной версиях, созданное с помощью компилятора MatLab и использующее библиотеки данной системы. В дистрибутив ПО входит комплект библиотек, основной исполняемый файл приложения и файлы, содержащие дополнительную информацию. Приложение имеет оконный интерфейс и предусматривает графический и табличный вывод результатов расчетов с их записью во внешние файлы.

При запуске приложения в режиме диалога с пользователем производится выбор исследуемого участка суши в Арктике и рассматриваемого временного промежутка. Границы участка задаются с помощью бинарного изображения-маски. Дальнейшая работа ПО осуществляется в полуавтоматическом режиме. Пользователь может вмешаться в процесс обработки данных на этапе распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов. Для каждого пятидесятого пикселя осуществляется последовательный вывод на экран в отдельные окна следующих результатов работы ПО: графика внутригодовой изменчивости РЯТ с отмеченным специальными значками положением границ периодов годового цикла, графика внутригодовой изменчивости восстановленных T_{sp} . После вывода первого графика пользователю предлагается возможность скорректировать положение границ периодов годового цикла, для чего используется «всплывающее» диалоговое окно. В случае выполнения корректировки обновленные значения положения границ становятся актуальными для ближайших 50 пикселей. В выходные файлы формата Excel записываются массивы восстановленных среднесуточных значений T_{sp} , отметки о положении границ периодов годового цикла и значения индикатора мерзлого/талого состояния грунта, а также значения индикаторов $И1г-И3г$ и статистических показателей их межгодовой изменчивости. Кроме того, по выбору пользователя во внешние файлы формата Bitmap могут быть записаны данные о пространственном распределении значений T_{sp} в пределах исследуемого участка суши.

3.3 Методика предварительного анализа данных спутниковой СВЧ радиометрии с использованием картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ

Перед применением алгоритма автоматизированной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики представляется целесообразным проведение визуальной оценки графических материалов, сформированных из исходных СВЧ радиометрических данных, прошедших первичную обработку. Это позволяет оперативно определять ключевые особенности анализируемых данных для конкретного

географического района и выделять временные периоды и пространственные области, для которых извлечение полезной информации с помощью используемых алгоритмов и программ может быть затруднено.

Решение указанных задач достигается использованием картосхем (планшетов) пространственно-временной изменчивости РЯТ, обеспечивающие наглядное представление спутниковых СВЧ радиометрических данных в пространственно-временных координатах. Предлагаемая методика формирования и использования таких картосхем делает визуальную оценку и интерпретацию радиоярких контрастов удобной и не требующей больших временных затрат, что важно при оперативном мониторинге состояния природных сред.

Картосхема пространственно-временной изменчивости РЯТ – это форма графического представления СВЧ радиометрических данных, позволяющая наглядно отобразить информацию о временной динамике РЯТ вдоль характеристических трансектов, проложенных через исследуемые территории и акватории. На плоскости отсчеты РЯТ компоуются в виде планшета, в поле которого каждая точка (отсчет РЯТ) имеет две координаты: пространственную (в условной системе координат, или в одной из общепринятых географических) и временную (идентификатор или порядковый номер суток, месяца или года).

Для решения задач предварительного анализа данных СВЧ радиометрии при мониторинге мерзлых грунтов Арктики картосхемы пространственно-временной изменчивости РЯТ создаются на основе данных с канала 6,9 ГГц СВЧ радиометра. Выбор этого спектрального канала обусловлен двумя основными причинами:

- 1) Согласно разделу 2.3, на указанной частоте для тундровых участков Арктики в зимний период ярко выражена линейная связь между $T_{сп}$ и $T_{я}$ на V-поляризации. Это позволяет использовать картосхемы, построенные по усредненным за январь-февраль отсчетам РЯТ с данного канала, для отслеживания тенденций межгодовых изменений состояния грунтов.
- 2) На частоте 6,9 ГГц и H-поляризации изменения РЯТ, вызванные вариациями коэффициента излучения среды из-за таяния снежного покрова, оттаивания/промерзания верхнего слоя грунтов, противонаправлены с изменениями $T_{сп}$. Прирост $T_{я}$ на $f = 36,5$ ГГц вследствие повышения $T_{сп}$ за пределами области интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги оказывается больше по сравнению с приростом $T_{я}$ на $f = 6,9$ ГГц (см. рисунок 30). Как следствие, интенсивные фазовые переходы влаги, вызывающие характерные резкие изменения РЯТ в весенне-летний и осенний периоды годового цикла В и

D, проще визуально идентифицировать на $f = 6,9$ ГГц (H) на фоне меньших по амплитуде колебаний РЯТ, не связанных с фазовыми переходами.

Формирование картосхем осуществляется в соответствии с предлагаемой последовательностью операций:

- 1) Из многолетнего архива СВЧ данных уровня L3, который содержит суточные мозаики распределения значений РЯТ в пределах северного полушария, автоматически с помощью созданной программы в среде MatLab отбираются отсчеты РЯТ для исследуемого характеристического трансекта. Выборки объединяются в многомерные массивы СВЧ данных.
- 2) При создании картосхем внутригодовой изменчивости РЯТ из полученных многомерных массивов данных производится выборка среднесуточных значений РЯТ с канала сенсора $f = 6,9$ ГГц для конкретного календарного года. При создании картосхем межгодовой изменчивости РЯТ отбираются отсчеты РЯТ для определенных месяцев за максимально доступное в архиве количество лет.
- 3) Производится осреднение значений РЯТ по необходимому временному интервалу, восстанавливаются интерполяцией или индексируются пропущенные значения РЯТ.
- 4) Осуществляется отображение полученных выборок значений РЯТ в виде картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ, проводится автоматическая или ручная калибровка цветовых шкал в соответствии с диапазонами изменения РЯТ, создаются дополнительные графические атрибуты (подписи, легенда).

Преимуществом получаемого описанным способом графического материала является возможность представления пространственно-временных изменений РЯТ на плоскости. Картосхемы, содержащие большой объем информации об изменчивости СВЧ излучательных свойств многослойных сред вдоль характеристического трансекта, могут быть легко выведены на печать и затем проанализированы без использования ПЭВМ. Аналогичным образом могут быть созданы картосхемы пространственно-временной изменчивости и для других параметров СВЧ излучения: коэффициента поляризации, спектральных градиентов, первых и вторых производных РЯТ по времени и пространству.

Фиксируемые в поле картосхемы радиояркостные контрасты одновременно отражают изменения физических, физико-химических и других свойств многослойных сред в пространстве и времени, т.к. РЯТ является интегральным показателем их состояния. Это дает возможность делать первичные выводы о состоянии грунтов, водной поверхности, снежного и растительного покрова в пределах исследуемой области в

определенные моменты годового цикла по результатам визуальной диагностики картосхем.

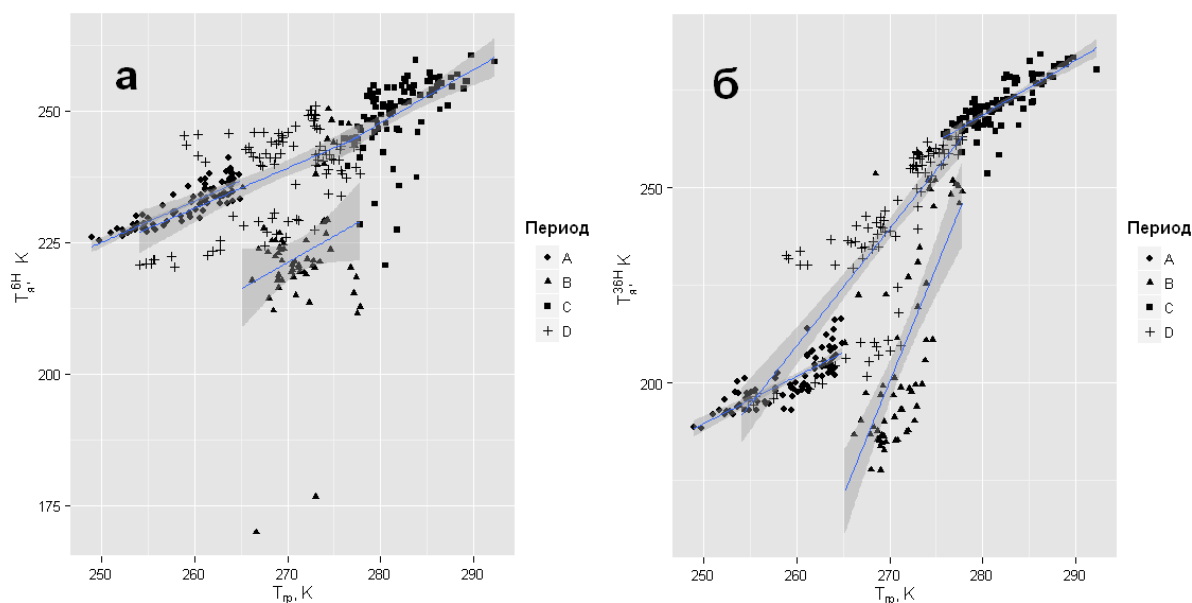


Рисунок 30 – Диаграммы рассеяния в пространствах $T_{я}^{6H} - T_{гр}$ (а) и $T_{я}^{36H} - T_{гр}$ (б) с линейной аппроксимацией зависимости между $T_{я}$ и $T_{гр}$ для периодов годового цикла А-Д (данные для участка У1 на ове Ямал, 2007 г., $f = 6,9$ ГГц, $36,5$ ГГц, Н-поляризация).

Картосхемы, построенные по СВЧ данным для областей, которые лежат вдоль меридиональных трансектов, позволяют одновременно наблюдать за динамикой РЯТ в нескольких ландшафтных зонах. Это дает возможность контролировать корректность выводов, сделанных для отдельных участков, путем перекрестной проверки результатов интерпретации для соседних зон в разные временные интервалы годового цикла. Пример картосхемы, построенной для меридионального трансекта 70° в.д. (Т1), приведен на рисунке 31.

К ключевым особенностям пространственно-временной изменчивости РЯТ, распознаваемым визуально в поле картосхемы, по которым, по мнению автора, допустимо делать первичные выводы о состоянии многослойных природных сред, относятся:

- 1) Резкие перепады РЯТ в весенне-летний период, обнаруживаемые на юге трансекта в более ранние даты, на севере – в более поздние (рисунок 31, б, е). Согласно результатам комплексного анализа данных контактных и дистанционных измерений, представленным в разделе 2.3, эти колебания на территории Арктики связаны с таянием снежного покрова и оттаиванием грунтов

в дни оттепелей. Предположительно, оттепели являются причиной таких колебаний и в других ландшафтных зонах;

- 2) Кривая «максимальной термодинамической температуры мерзлого состояния грунтов», пересекающая поле картосхемы с марта на юге до июня на севере (рисунок 31, ж). Она отражает границы временного интервала, на котором наблюдается совпадение максимумов коэффициента излучения и термодинамической температуры многослойной среды, вследствие чего отмечаются наиболее высокие до начала вегетационного периода значения РЯТ.
- 3) Кратковременные периоды, в которые происходит освобождение водных объектов на разных широтах от ледового покрова (рисунок 31, в, г, д). Наиболее четко различимы на участках трансекта с большой долей площади, занимаемой водоемами и водотоками, по резкому снижению РЯТ до некоторого уровня, на котором она остается до ледостава;
- 4) Затяжное снижение РЯТ в весенний период правее кривой «максимальной температуры мерзлого состояния грунтов», свидетельствующее об интенсификации процессов таяния, окончательном сходе снежного покрова и максимальном увлажнении грунтов;
- 5) Образование полыней в акваториальных частях трансектов в осенний, зимний и весенний периоды, характеризующееся существенным снижением РЯТ на участках трансекта, где они проявляются (рисунок 31, а).

Изменения состояния природных сред, находящие отражение в особенностях пространственно-временной изменчивости РЯТ №№ 1, 3, 4, 5, диагностируются и на картосхемах, построенных по значениям коэффициента поляризации. Они также могут быть использованы для выявления процессов таяния снежного покрова и грунтов, мониторинга установления и схода ледового и снежного покровов.

Результатирующая методика предварительного анализа спутниковых СВЧ радиометрических данных включает в себя следующие этапы:

1. Формирование картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ в соответствии с изложенной выше последовательностью операций;
2. Выявление ключевых особенностей пространственно-временной изменчивости РЯТ в поле картосхемы;
3. Запись в текстовый файл информации о положении пространственно-временных областей, в пределах которых может быть затруднено использование алгоритма оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики, в поле картосхемы.

При предварительном анализе СВЧ радиометрических данных в межгодовом масштабе автором также использован предложенный профессором В.В. Мелентьевым подход, согласно которому в евразийском секторе Арктики усредненные за зимние месяцы РЯТ на частотах ниже 35 ГГц могут быть использованы как индикатор межгодовых изменений состояния ММГ [108]. Это связано, прежде всего, с тем, что в условиях суровых зим температура поверхностных слоев грунтов не поднимается выше -10°C , что является гарантией минимального количества жидкой воды в их составе (см. раздел 1.3), и, как следствие, стабильности коэффициентов излучения [106]. По данной причине связь между РЯТ на V-поляризации и термодинамической температурой грунтов оказывается близка к линейной (см. раздел 2.3). Это дает возможность по усредненным за зимние месяцы РЯТ осуществлять трендовые оценки температурных изменений в толщах грунтов (СМГ и ММГ) в региональном и глобальном масштабе.

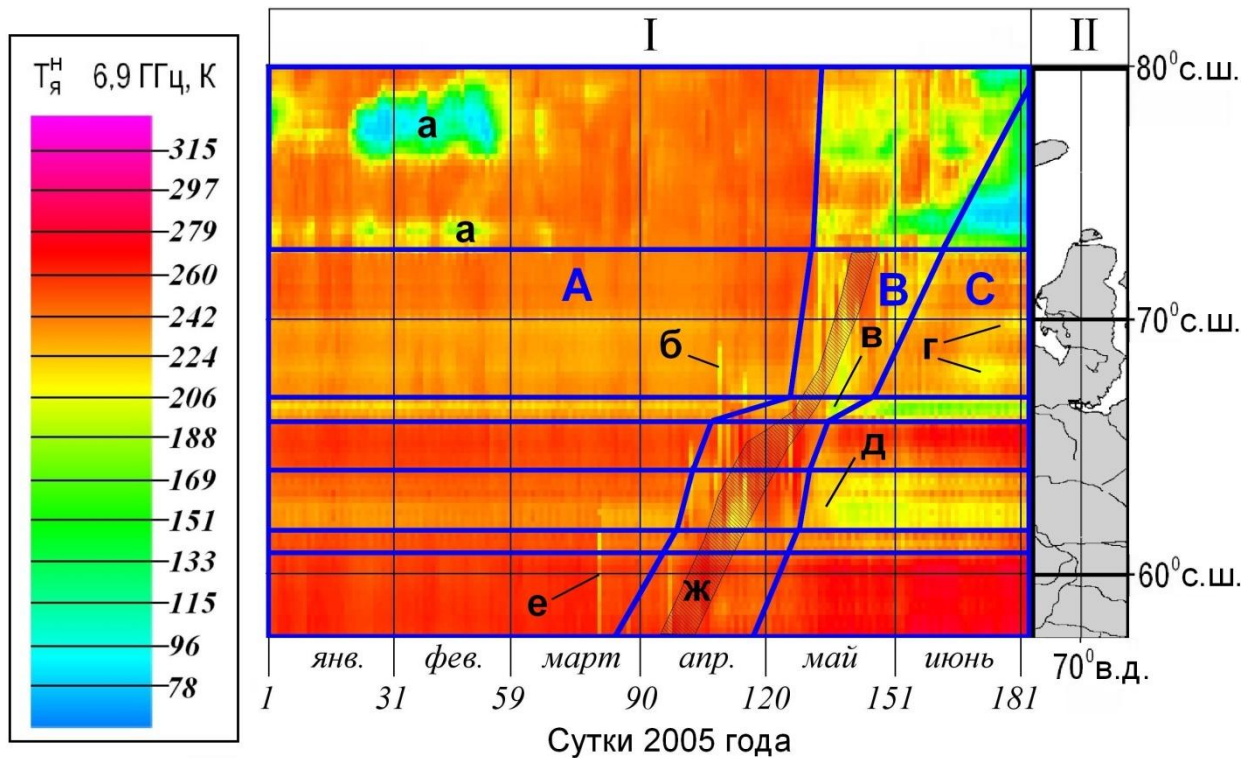


Рисунок 31 – Ключевые особенности внутригодовой изменчивости состояния грунтов и других компонентов многослойных природных сред, распознаваемые визуально по радиояркостным контрастам в поле картосхемы (I) вдоль трансекта Т1 (II): а – открытие квазистационарных полей у мыса Желания и северной оконечности п-ова Ямал; б – первые весенние оттепели в тундровой зоне (п-ов Ямал); в – начало схода льда в устье р. Обь; г – таяние льда на внутренних водоемах п-ова Ямал; д – оттаивание влаги в водно-болотных комплексах; е – первые оттепели в южной тайге; ж – кривая «максимальной температуры мерзлого состояния грунтов». А, В, С – периоды внутригодовой изменчивости состояния грунтов Арктики.

Таким образом, картосхемы пространственно-временной изменчивости РЯТ (V), построенные по СВЧ данным с канала $f = 6,9$ ГГц (на данной частоте, как было показано, вклад сухого снежного покрова в результирующее СВЧ излучении многослойной среды минимален), усредненным за месяцы январь и февраль, позволяют визуально оценить относительную суровость зимних сезонов в соседние годы по контрастам РЯТ.

Визуальная оценка радиояркостных контрастов, представленных на картосхемах пространственно-временной изменчивости РЯТ, выступает в качестве предварительного этапа анализа и интерпретации СВЧ данных в целях мониторинга мерзлых грунтов. Для проверки суждений о состоянии грунтов на конкретном участке, сделанных на основе визуальной оценки СВЧ данных, требуется использование методики автоматизированной оценки, описываемой в следующем разделе, а также опорных данных с ГМС и ГКС.

Дополнительно отметим также еще одно возможное приложение картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ в области оперативного контроля природных сред Арктики: краткосрочное прогнозирование оттаивания грунтов и таяния снежного покрова Арктики в период В годового цикла. Возможность такого использования картосхем была исследована автором в пилотных экспериментах по прогнозированию оттепелей по данным картосхем.

Основную роль в определении возможности наступления оттепелей в условиях Арктики играет состояние многослойных сред на участках меридиональных трансектов, расположенных южнее исследуемого участка. Пример фрагмента картосхемы, позволяющего сделать вывод о генеральной направленности изменений температуры среды, показан на рисунке 32. Черная стрелка на фрагменте 1а отражает постепенное «продвижение» оттепелей, к которым приурочены резкие понижения РЯТ, к северу с течением времени. По зафиксированному на картосхеме для суток 78-136 характеру изменчивости РЯТ становится возможным спрогнозировать оттепели на широте $69^{\circ} 43'$ в последующие несколько суток. Результаты опорных измерений температуры приземного воздуха на 78-140 сутки с ГМС, расположенных на рассматриваемых широтах в непосредственной близости от трансекта, показаны на рисунке 32 (1б и 2б).

Несмотря на выявленную возможность прогнозирования оттепелей по картосхемам пространственно-временной изменчивости РЯТ, в рамках настоящей работы не выполнены вероятностные оценки прогнозов, что не позволяет рекомендовать предложенный способ прогнозирования к внедрению без дополнительных исследований.

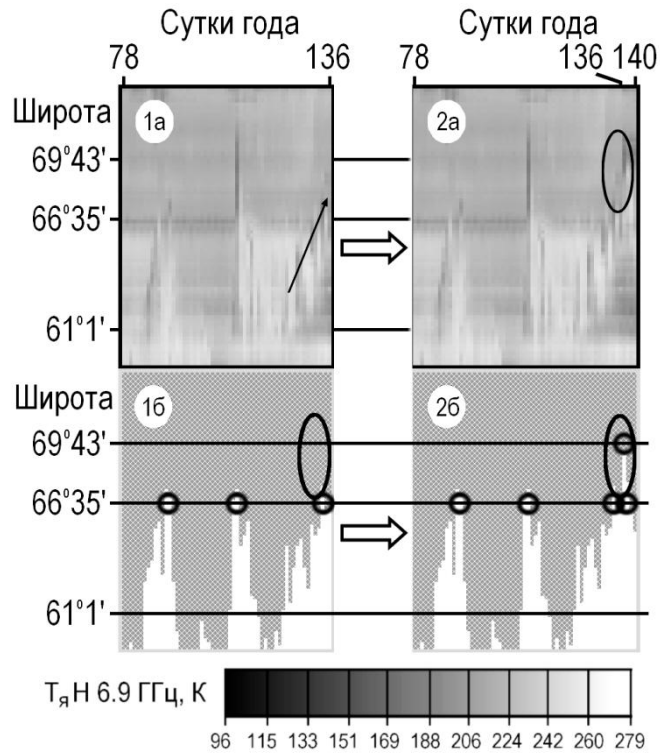


Рисунок 32 – Иллюстрация возможности краткосрочного прогнозирования состояния многослойных сред по фрагментам картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ. 1а, 2а – фрагменты картосхем, 1б, 2б – бинарные изображения, полученные путем двумерной интерполяции данных измерений температуры приземного воздуха с ГМС, расположенных вдоль трансекта Т1 (белый – $T_{возд} > 0$ °С, серый – $T_{возд} < 0$ °С). Черными овалами обозначены области ожидаемых оттепелей, черными кругами – точки переходов $T_{возд}$ через отметку 0 °С на исследуемых широтах

3.4 Методика автоматизированной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов

Автоматизированная оценка изменчивости состояния мерзлых грунтов выполняется с использованием разработанного программно-алгоритмического обеспечения с учетом рекомендаций, сформированных на этапе предварительного анализа СВЧ радиометрических данных с помощью описанной в предыдущем разделе методики. Настоящая методика предполагает выполнение операций в приведенной ниже последовательности:

1. Определяются границы исследуемого участка суши и временного интервала, для которого выполняется оценка. По имеющемуся шаблону с заданными разрешением и географической проекцией в формате Geotiff с помощью растрового редактора или ГИС-приложения создается маска исследуемого

участка, необходимая для задания пространственных границ участка при работе ПО.

2. Производится актуализация локальной базы спутниковых данных. База данных, организованная в виде дерева папок, пополняется прошедшими первичную обработку данными СВЧ измерений с сенсоров AMSR-E и AMSR-2, предоставленными дата-центрами NSIDC и Жаха. Данные получаются с соответствующих ftp-серверов через интернет-соединение с помощью ПО FileZilla.
3. Выполняется актуализация архива опорных данных с ГКС и ГМС для исследуемого участка. С помощью текстовых редакторов или ГИС-приложения разнородные данные из нескольких источников обрабатываются и сводятся в файлы формата Excel, откуда они впоследствии могут быть считаны разработанным ПО. Список параметров, измеряемых на ГМС и ГКС, значения которых включены в архив опорных данных, приведен в разделе 2.1.3.
4. Производится запуск приложения для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным. В режиме диалога указываются необходимые входные данные, производится восстановление значений индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов, выполняются расчеты по определению статистических показателей изменчивости индикаторов, запись результатов во внешние файлы.
5. Результаты расчетов дополнительно проверяются для пространственно-временных областей, в которых согласно результатам предварительного анализа СВЧ радиометрических данных могут наблюдаться трудности при использовании программно-алгоритмического обеспечения.
6. Для участков, расположенных вблизи ГКС и ГМС, производится сопоставление результатов восстановления значений индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики с опорными данными наземных контактных измерений.
7. Производится дополнительная статистическая и графическая обработка полученных данных с учетом требований конечных пользователей информации к форме представления результатов оценки.

3.5 Валидация программно-алгоритмического обеспечения для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики

Валидация алгоритма и программы количественной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики выполнена для трех тестовых участков У1, У2, У3 на материале архива данных измерений СВЧ радиометра AMSR-E за 2005-2008 гг. В ходе испытаний программно-алгоритмического обеспечения были восстановлены значения индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов *ИИс-ИЗс* (т.е. среднесуточных значений T_{sp} , значений индикатора замерзания/оттаивания, индикатора принадлежности суток к периодам внутригодовой изменчивости состояния грунтов).

Эффективность распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики с использованием двух различных подходов была исследована ранее при сравнительных испытаниях двух конкурирующих алгоритмических блоков (см. раздел 3.1.2). С учетом выявленной высокой эффективности распознавания было решено провести дополнительные мероприятия по валидации выбранного блока. Были выполнены эксперименты по автоматизированному распознаванию границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов А-Д на участках вдоль трансекта Т1 в Арктике и за ее пределами. Выборка данных для испытаний включает полные годовые ряды РЯТ на $f = 6,9$ и $f = 36,5$ ГГц за 2005-2008 гг.

Результаты распознавания совпали с ожидаемыми по результатам визуальной оценки картосхем, эффективность распознавания границ с помощью разработанного алгоритмического блока более 75% достигнута только для участков вдоль трансекта, расположенных севернее $66,56$ °с.ш. (т.е. расположенных в Арктике). Наиболее надежно выявляется граница А/В, наименее надежно – граница С/Д. Отсюда следует, что разработанный алгоритм пригоден для определения положения границ периодов А-Д прежде всего в пределах Арктики. Результаты его использования для территорий вдоль трансекта Т1 в 2004 г. проиллюстрированы на рисунке 33.

В ходе анализа результатов восстановления среднесуточных значений T_{sp} для тестовых участков полученные значения были сопоставлены с результатами контактных измерений данного параметра состояния грунтов с площадок ближайших ГКС (Марре-Сале, Аяч-Яга, г. Родинка).

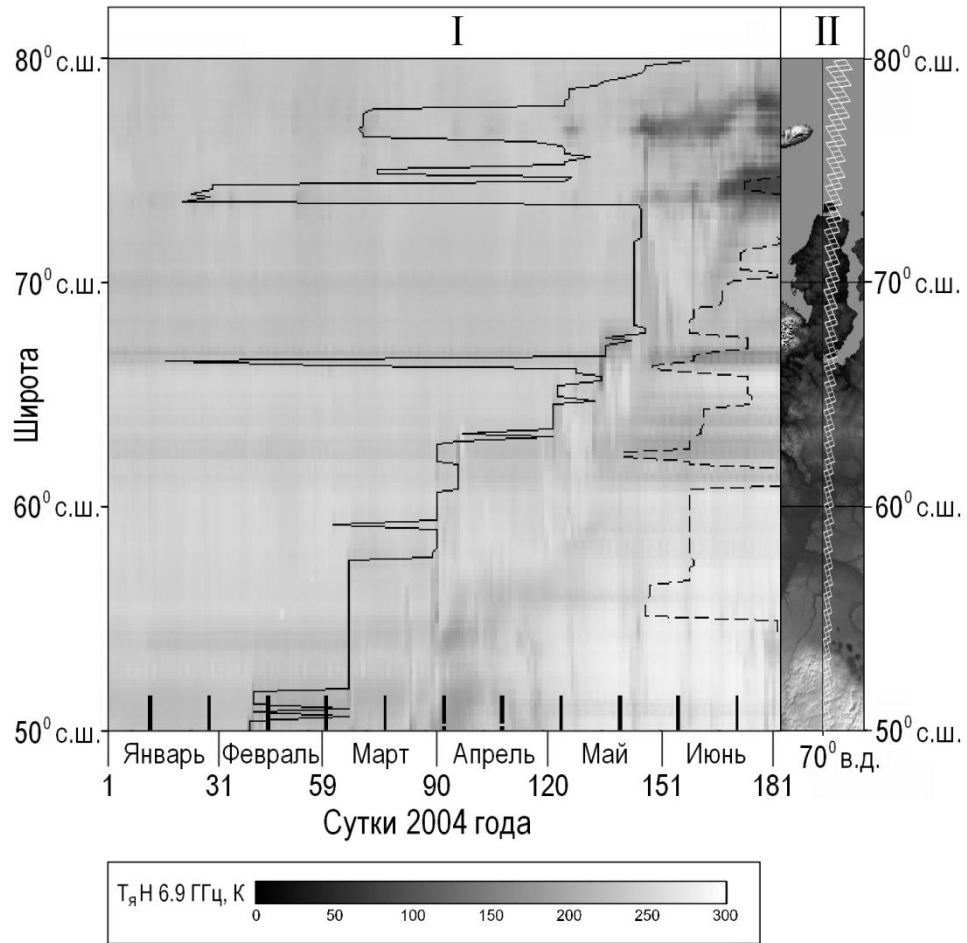


Рисунок 33 – Результаты испытания алгоритма автоматизированного распознавания границ между периодами годового цикла для территорий в пределах разных ландшафтных зон вдоль трансекта Т1 (показано восстановленное положение границ А/В и В/С – черная сплошная и прерывистая линия соответственно)

В качестве примера на рисунках 34 и 35 представлена картина изменчивости восстановленных по данным AMSR-E для участков У1 и У2 и измеренных контактными методами на соответствующих ГКС среднесуточных $T_{гр}$ с начала календарного года до момента окончательного схода снежного покрова (т.е в периоды годового цикла А и В). На этих же графиках показана изменчивость $T_{возд}$ и $T_{я}$ на $f = 6,9$ ГГц, по которым проводилось восстановление. Заданная в данном случае температурно-влажностная зависимость соответствует грунту с гранулометрическим составом, близким к составу глины [60].

Минимальные средние отклонения восстановленных $T_{гр}$ от измеренных контактными методами были получены для всех трех тестовых участков для грунта, близкого по температурно-влажностной зависимости к глине. Однако отношение количества прочносвязанной влаги к количеству рыхлосвязанной [10, 110], как показали расчеты, оказывается наиболее высоким в случае участка на п-ове Ямал.

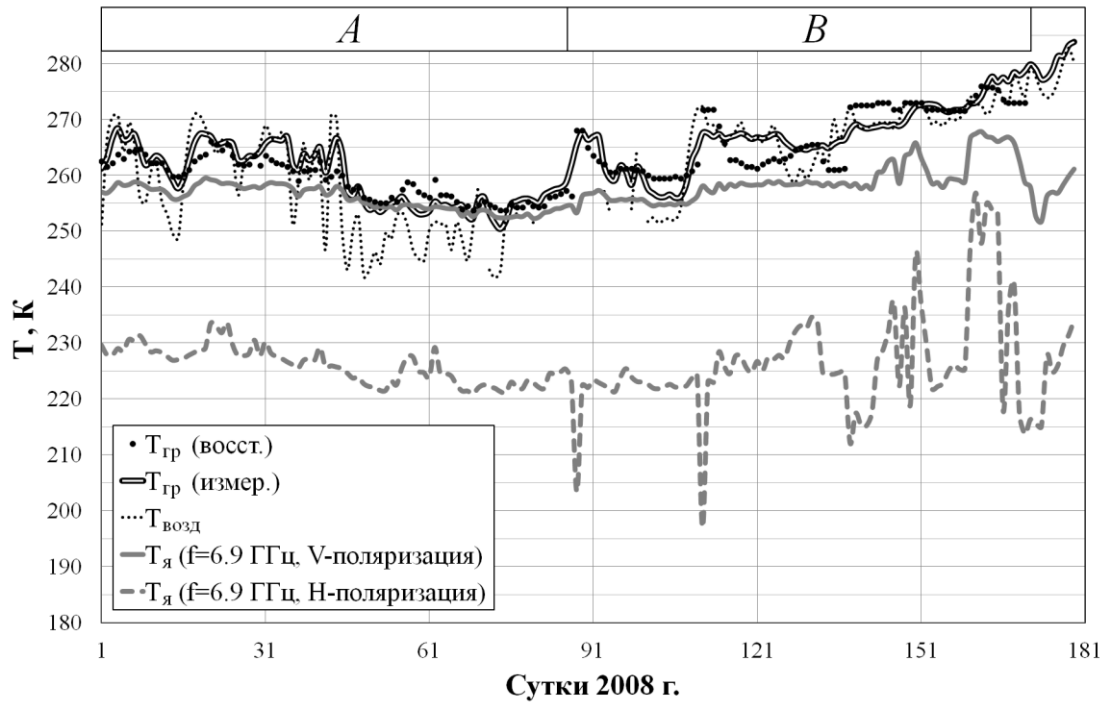


Рисунок 34 – Результаты восстановления $T_{гр}$ по данным AMSR-E для тестового участка У1 в периоды А и В годового цикла в сопоставлении с результатами измерений $T_{гр}$ и $T_{возд}$ на площадках ГКС и ГМС Марре-Сале и зафиксированными с ИСЗ РЯТ участка ($f = 6,9$ ГГц), 2008 г.

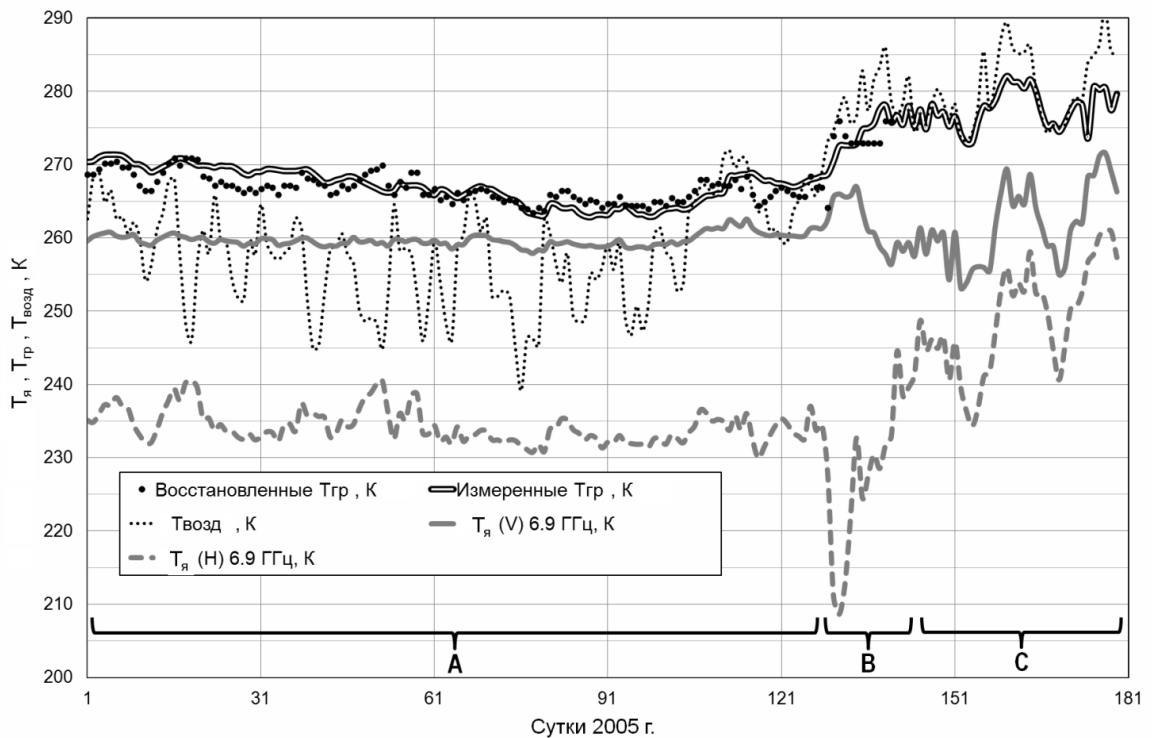


Рисунок 35 – Результаты восстановления $T_{гр}$ по данным AMSR-E для тестового участка У2 в периоды А и В годового цикла, сопоставленные с результатами контактных измерений $T_{гр}$ и $T_{возд}$ на площадках ГКС Аяч-Яга и ГМС Воркута и исходными РЯТ ($T_{я}$) участка при $f = 6,9$ ГГц (V- и H-поляризация), 2005 г.

Значения СКОш, рассчитанные по отклонениям восстановленных T_{cp} от измеренных контактным методом (с помощью логгеров) для периодов А и В 2005-2008 гг., приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Среднеквадратичные ошибки (СКОш) для рядов восстановленных T_{cp} в периоды А и В годового цикла для тестовых тундровых участков У1-У3

Участок У1, Ямал				
Год	Период А		Период В	
	Временные границы (сутки)	СКОш, К	Временные границы (сутки)	СКОш, К
2005	1-131	4,5*	132-152	3,9*
2006	1-127	-	128-148	-
2007	1-106	1,7	107-166	2,6
2008	1-87	2,4	88-170	3,2
Участок У2, Воркута				
Год	Период А		Период В	
	Временные границы (сутки)	СКОш, К	Временные границы (сутки)	СКОш, К
2005	1-129	1,6	130-140	2,5
2006	1-125	2,6	126-151	3,1
2007	1-96	3,0	97-139	2,2
2008	1-3	0,9	4-170	1,2
Участок У3, Якутия				
Год	Период А		Период В	
	Временные границы (сутки)	СКОш, К	Временные границы (сутки)	СКОш, К
2005	1-116	2,6	117-149	3,3
2006	1-129	1,8	130-142	2,2
2007	1-124	3,1	125-136	4,7
2008	1-121	2,6	122-141	3,0

* требуется дополнительная проверка данных контактных измерений

Как видно из таблицы и представленного изображения, расхождения между восстановленными по СВЧ данным и измеренными контактным методом значениями T_{cp} для весенне-летнего периода В близки к полученным для зимнего периода А. Данный результат имеет существенную практическую ценность в условиях обозначенных ранее трудностей, с которыми сопряжено восстановление T_{cp} по данным СВЧ радиометрии в период В. В этот временной интервал происходит активный метаморфизм снежного покрова, вызванный циклическими переходами температуры окружающего воздуха через отметку 0 °С, оттаивание верхнего слоя грунта. Как следствие, усиливающееся в весенний период экранирующее влияние снега в совокупности со сложностью описания процессов теплопереноса в толще грунта и слое снежного покрова затрудняет определение реальных

значений T_{zp} . Как показали дополнительные расчеты, исключение из алгоритма процедур вычисления значений КДП снежного покрова как функции предыдущих состояний многослойной среды ведет к увеличению СКОш с 2,7 К до 3,5 К, т.е. почти на 30% (для полной выборки с трех тестовых участков за 2005-2008 гг.). В качестве примера на рисунке 36 показаны результаты восстановления на участке У2 в 2007 г. в том и другом случае.

Разработанная модель и построенное на ее основе программно-алгоритмическое обеспечение для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов позволяет обеспечить снижение величины ошибок восстановления T_{zp} по сравнению с существующими алгоритмами восстановления, в частности, по сравнению с регрессионными моделями (таблица 17). Это оказалось возможным благодаря учету метаморфизма снега путем изменения среднесуточных КДП снежного покрова согласно ретроспективным данным о предыдущих состояниях многослойной среды (информации о числе оттепелей и положении дня относительно границы А/В), введению ограничений на изменения T_{zp} в пределах одних суток, а также учету влияния макрорельефа на СВЧ излучательные свойства многослойной среды. В ходе расчетов было установлено, что для У3 учет макрорельефа оказывает существенное влияние на разницу между восстановленными и измеренными значениями T_{zp} в период стабильно мерзлого состояния грунтов (рисунок 37).

Таблица 17 – Среднеквадратичная ошибка восстановления значений T_{zp} на тестовых участках У1-У3 (СКОш) в периоды годового цикла А и В 2005-2008 гг. и коэффициент детерминации R^2 при использовании алгоритма оценки на основе разработанной модели СВЧ излучающей среды и альтернативных регрессионных моделей

№ пп	Модель, положенная в основу алгоритма восстановления значений параметров грунтов	СКОш, К		R^2	
		для периода		для периода	
		А	В	А	В
1	Разработанная модель многослойной СВЧ излучающей среды	2,72	2,78	0,67	0,54
2	Модель парной регрессии $T_{zp} = a \cdot T_{я}^{6.9V} + b$	4,45	3,2	0,10	0,31
3	Модель парной регрессии $T_{zp} = a \cdot T_{я}^{36.5V} + b$	4,61	3,3	0,03	0,27
4	Модель множественной регрессии $T_{zp} = a \cdot T_{я}^{6.9V} + b \cdot T_{я}^{36.5V} + c$	4,41	3,1	0,11	0,35
5	Модель множественной регрессии $T_{zp} = a \cdot T_{я}^{6.9V} + b \cdot T_{я}^{36.5V} + c \cdot T_{я}^{6.9H} + d \cdot T_{я}^{36.5H} + e$	4,0	3,1	0,27	0,37

При сопоставлении результатов расчетов с рядами контактных измерений для участка У1 были отмечены высокие значения СКОш в период А 2005 г., предположительно вызванные ошибками в определении $T_{гр}$ контактным методом.

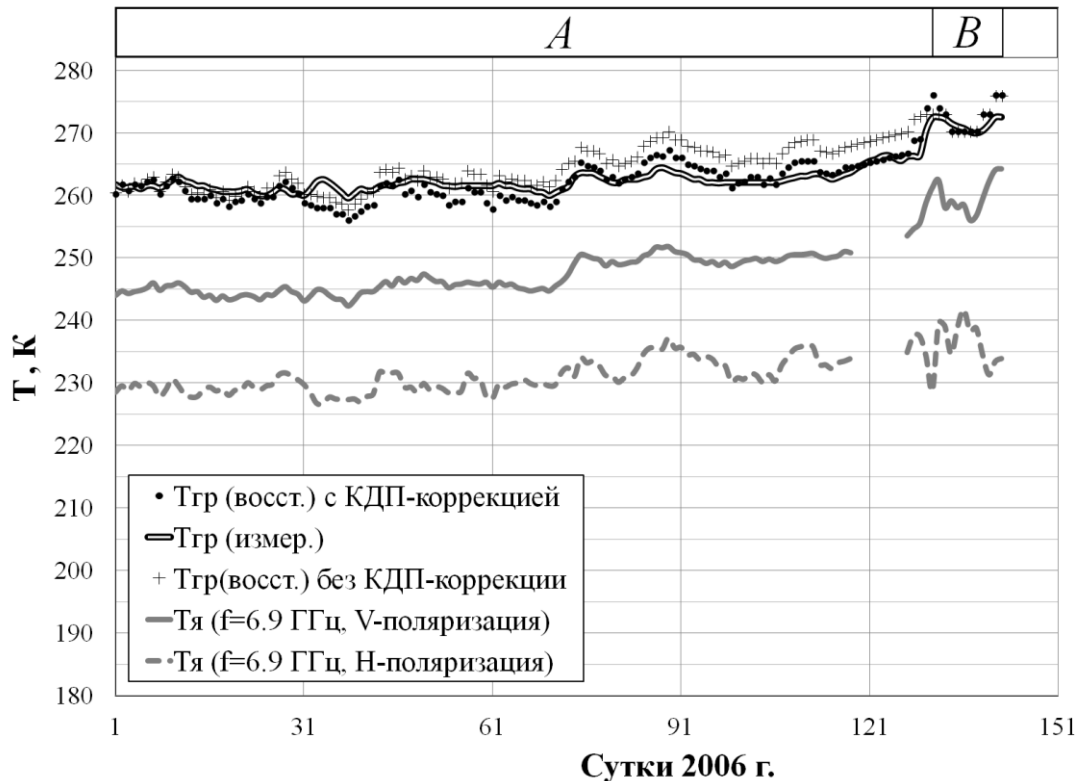


Рисунок 36 – Результаты восстановления $T_{гр}$ по данным AMSR-E для тестового участка У3 в периоды А и В годового цикла без учета и с учетом зависимости КДП снежного покрова от предыдущих состояний многослойной СВЧ излучающей среды, сопоставленные с результатами контактных измерений $T_{гр}$ на площадке ГКС г. Родинка и исходными РЯТ ($T_{я}$) участка при $f = 6,9$ ГГц (V- и H-поляризация), 2006 г.

На следующем этапе валидации выполнено сопоставление абсолютных величин среднемесячных январских и февральских $T_{гр}$, рассчитанных по восстановленным среднесуточным значениям для тестовых участков У1-У3, с усредненными за те же временные интервалы результатами измерений $T_{гр}$ с ГКС (таблица 18). В столбцах с данными контактных измерений четко прослеживаются различия в усредненных значениях $T_{гр}$ между двумя годами с контрастными по своей суровости зимами – 2006 и 2007 гг. Эти различия фиксируются и для восстановленных январских $T_{гр}$, в феврале же знаки контрастов для результатов численных экспериментов в половине случаев не совпадают с фиксируемыми по данным контактных измерений. Предположительно, данное несовпадение обусловлено пространственной неоднородностью гранулометрических свойств грунтов в пределах тестовых участков, что вызывает

отклонение их реальных температурно-влажностных зависимостей от задаваемых при расчете T_y . Не представляется возможным выполнить корректное сравнение точечных (локальных) измерений $T_{гр}$ и $T_{гр}$, восстановленных по площадным СВЧ измерениям. В целом, исходя из полученных СКОш, результаты восстановления $T_{гр}$, для тестовых участков У1, У2, У3 удовлетворительно согласуются с данными контактных измерений.

Таблица 18 – Среднемесячные значения $T_{гр}$, восстановленные по 6,9 ГГц измерениям AMSR-E для трех тестовых тундровых участков У1-У3 и измеренные контактным методом на глубине 2 см на площадках геофизиологических стационаров Марре-Сале, Аяч-Яга и Родинка

У1, Ямал				
Год	Январь		Февраль	
	$T_{гр\text{ восст.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ измер.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ восст.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ измер.}}, \text{ К}$
2005	264,2	260,8*	261,6	258,1*
2006	258,1	-	256,5	-
2007	261,8	261,9	255,6	253,8
2008	262,8	264,1	258,7	259,4
У2, Воркута				
Год	Январь		Февраль	
	$T_{гр\text{ восст.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ измер.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ восст.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ измер.}}, \text{ К}$
2005	268,6	270,1	267,6	268,0
2006	267,8	269,1	267,6	266,8
2007	269,4	271,7	265,4	269,3
2008	270,5	271,8	270,3	271,3
У3, Якутия				
Год	Январь		Февраль	
	$T_{гр\text{ восст.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ измер.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ восст.}}, \text{ К}$	$T_{гр\text{ измер.}}, \text{ К}$
2005	264,8	267,0	263,3	266,1
2006	260,4	261,1	259,4	261,5
2007	262,8	265,6	261,5	264,6
2008	263,1	265,2	260,0	263,1

* требуется дополнительная проверка данных контактных измерений

Проведенные тестовые испытания разработанного программно-алгоритмического обеспечения как технической реализации метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики показали его соответствие требованиям, изложенным в разделе 1.6. Обеспечена близкая точность восстановления значений $T_{гр}$ в периоды стабильно мерзлого состояния грунтов и в периоды интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги, сопоставимая с максимальной точностью существующих передовых методов, описанных в 1.6. Для зимне-весенних периодов стабильно мерзлого состояния грунтов в 82% рассмотренных случаев СКОш не превышает 3 К, для весенне-летних периодов в 82 %

случаев СКОш < 3,5 К. Значение СКОш, полученное для полной выборки с трех тестовых участков за 2005-2008 гг., равно 2,7 К, что соответствует приросту точности почти на 30% по отношению к точности метода восстановления, основанного на использовании модели множественной регрессии №5 ($T_{zp} = a \cdot T_{я}^{6.9V} + b \cdot T_{я}^{36.5V} + c \cdot T_{я}^{6.9H} + d \cdot T_{я}^{36.5H} + e$) при раздельном рассмотрении периодов А и В.

Стоит отметить, что, как показали вспомогательные расчеты, при использовании для восстановления значений T_{zp} моделей множественной регрессии раздельное рассмотрение периодов годового цикла А и В также позволяет повысить точность восстановления. В частности, при использовании модели №5 это выразилось в уменьшении СКОш для 4-летней выборки с трех тестовых участков с 4,3 К до 3,8 К, т.е. более чем на 10%. Это подтверждает полезность предложенного деления календарного года на периоды, не совпадающие с традиционно выделяемыми сезонами.

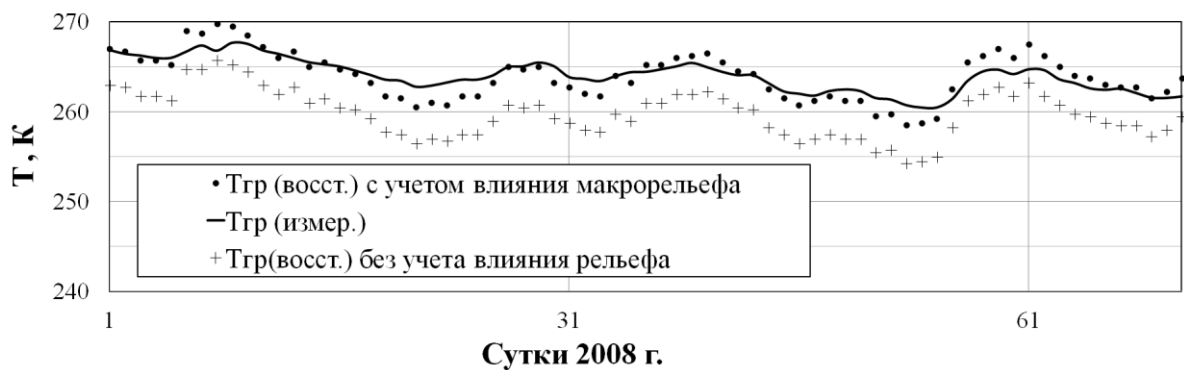


Рисунок 37 – Результаты восстановления T_{zp} по данным AMSR-E для тестового участка УЗ в период А годового цикла без учета и с учетом влияния макрорельефа, сопоставленные с результатами контактных измерений T_{zp} на площадке ГКС г. Родинка, 2008 г.

3.6 Выводы по разделу

Для практической реализации метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по данным спутниковой СВЧ радиометрии разработано соответствующее программно-алгоритмическое и методическое обеспечение.

Разработанный алгоритм оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов состоит из четырех блоков и позволяет восстанавливать значения индикаторов изменчивости состояния мерзлых грунтов во внутригодовом и межгодовом масштабе по данным спутниковых поляризационных СВЧ радиометрических измерений на частотах $f = 6,9$ ГГц

и $f = 36,5$ ГГц. Алгоритм программно реализован в виде имеющего оконный интерфейс приложения, использующего библиотеки функций MatLab.

Алгоритмический блок для автоматизированного распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов Арктики использует для распознавания границ между периодами А и В, С и D разность РЯТ в каналах 36,5 ГГц и 6,9 ГГц, а для выявления границы C/D – первую производную от стандартного отклонения в 30-дневных выборках РЯТ на $f = 6,9$ ГГц.

Алгоритмический блок для восстановления термодинамической температуры поверхностного слоя грунтов построен на базе модели собственного СВЧ излучения многослойной среды «грунт-снег-атмосфера». В нем реализованы основные новшества разработанного метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов: использование данных о предыдущих состояниях многослойной среды для расчета КДП ее слоев и векторно-координатный подход к определению геометрии визирования для учета влияния макрорельефа поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства.

Разработанная методика предварительного анализа спутниковых СВЧ радиометрических данных основана на использовании картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ, которые строятся для характеристических меридиональных трансектов, по которым в координатах «время-географическая широта» визуальным способом производится выявление особенностей изменчивости РЯТ, служащих 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. Методика автоматизированной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным включает в себя описание последовательности операций с использованием разработанного программно-алгоритмического обеспечения, необходимых для оценки изменчивости состояния грунтов.

Валидация разработанного программно-алгоритмического обеспечения выполнена на материале архива данных с СВЧ радиометра AMSR-E за 2005-2008 гг. Результаты восстановления значений T_{cp} для трех тестовых участков, расположенных на северо-востоке ЕТР, севере ЗС и северо-востоке ВС, хорошо согласуются с опорными данными о температуре поверхностного слоя грунтов с площадок ближайших к ним геокриологических стационаров (СКОш составляет в среднем 2,72 К для периода А и 2,78 К для периода В). Эффективность распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов для тестовых участков составляет 83-100%.

4 Определение пространственных границ применимости метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики и его апробация

4.1 Определение пространственных границ применимости метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики с помощью методики автоматизированной идентификации ландшафтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии

4.1.1 Введение

Вследствие значительной пространственной неоднородности и высокой изменчивости свойств мерзлых грунтов в пределах даже небольших по площади участков суши Арктики определение границ географической области, в которой метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным спутниковой СВЧ радиометрии может быть использован без существенной потери точности, оказывается сложной задачей. Данная проблема усугубляется малым количеством тестовых полигонов, на которых проводятся контактные измерения параметров состояния грунтов, в евразийском секторе Арктики. По этой причине валидация разработанного программно-алгоритмического обеспечения для оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов, выполненная для ряда тестовых участков Арктики, не является основанием для утверждения о возможности применения разработанного метода на всей территории Арктики. Переход к оценке состояния мерзлых грунтов в региональном и глобальном масштабе создает необходимость выделения районов с относительно однородными климатическими, геокриологическими, фитогеографическими, геоморфологическими условиями и, соответственно, свойственными им характерными особенностями внутригодовой изменчивости СВЧ излучательных свойств. Такое районирование в условиях малого количества тестовых полигонов может служить основой для установления границ области, использование в которой разработанного метода не сопряжено с существенным уменьшением точности оценки в сравнении со случаем его использования на тестовых участках.

Согласно Л.С. Бергу, ландшафт – это группировка предметов и явлений, в которой особенности рельефа, климата, вод, почвенного и растительного покрова, животного мира и деятельности человека сливаются в единое гармоническое целое, типически повторяющееся на протяжении данной зоны земли [6]. Традиционное ландшафтное районирование отражает естественно-историческое деление территорий на области, однородные в отношении целого комплекса условий.

РЯТ также является интегральным параметром, характеризующим состояние многослойной среды, состоящей из слоев грунтов, растительности, снежного покрова со свойственными им особенностями. Это создает возможность выполнения ландшафтного районирования на основе набора показателей, характеризующих временную динамику РЯТ многослойных сред [29]. Получаемое при СВЧ идентификации и дифференциации ландшафтов членение территорий применимо в первую очередь для СВЧ мониторинга природных сред, поскольку позволяет выделить области с определенным характером изменчивости излучательных свойств. Первоочередной задачей в этом случае является установление соответствия между выделяемыми традиционно ландшафтными и полученными при СВЧ идентификации однородными областями.

Работы по СВЧ идентификации разных типов земной поверхности в региональном и глобальном масштабе проводились в СССР и за рубежом начиная с 1970-х гг. Возможность идентификации широкого спектра земных покровов по СВЧ сигнатурам была доказана в ходе натурных и численных модельных экспериментов по исследованию излучательной способности природных и техногенных образований, при широкомасштабном СВЧ картировании территорий и акваторий в различных климатических поясах [9, 23, 67, 85, 127]. В работе [133] была выполнена идентификация 16 основных классов подстилающей поверхности в пределах тестовых областей Африки и Южной Америки по 6 мультивременным композитам низкого разрешения с сенсора SSM/I. Однако идентификация на основе динамики лишь одного показателя – разности между РЯТ на V- и H-поляризации сигнала на $f = 37$ ГГц – обусловила невысокую общую точность классификации (для Южной Америки менее 60%). В ходе исследования [88] по СВЧ данным с сенсора SMMR за осенние тестовые периоды была выполнена идентификация 7 категорий ландшафтных комплексов на юге Финляндии, 6 – на севере. Использование данных с нескольких спектральных каналов (10,7 ГГц, 18 ГГц и 37 ГГц на V- и H- поляризации) совместно с моделью спектральной смеси обеспечило возможность проведения субпиксельного анализа. Однако последующие работы [84, 116] показали, что даже в случае использовании моделей спектральных смесей не удастся с удовлетворительной точностью восстановить долю площади элемента разрешения сенсора, занимаемую разными типами подстилающей поверхности, при наличии более 3 ее типов в пределах элемента разрешения.

4.1.2 Используемые алгоритмы и наборы информативных признаков

Автором было принято решение проводить СВЧ идентификацию ландшафтов на основе комплекса признаков, отражающих временную динамику РЯТ многослойных излучающих сред на $f = 6,9$ ГГц и $f = 36,5$ ГГц. Испытания создаваемой методики СВЧ идентификации были выполнены на материале архивов съемки СВЧ радиометра AMSR-E для территорий вдоль меридиональных трансектов T1 и T2, пересекающих «ключевые» районы (см. раздел 2.2).

В ходе обработки исходных СВЧ данных уровня L3 были получены ежедневные выборки значений РЯТ вдоль трансектов T1 и T2 практически для всего периода успешного функционирования сенсора AMSR-E (январь 2003 г. – октябрь 2011 г.). Выборки были объединены в многомерные массивы отсчетов РЯТ с соответствующими пространственными (географическая широта центра участка, представляемого пикселем), временными (порядковый номер суток в году) и спектральными (частота зондирования и поляризация сигнала) координатами. По данным из полученных многомерных массивов РЯТ и проводилась СВЧ идентификация.

В качестве основы для создаваемой методики СВЧ идентификации ландшафтов было выбрано два алгоритма автоматизированной классификации, один из которых предполагает создание обучающих выборок (алгоритм №2), в другом реализована концепция последовательной пороговой классификации без обучения (алгоритм №1).

Алгоритм №1 для последовательной пороговой классификации без обучения реализован в виде статичного «дерева решений», согласно которому осуществляется отнесение пикселей к тому или иному типу ландшафтов при сопоставлении значений информативных признаков для пикселей с выбранными априорно порогами, равными по величине усредненным по трансекту значениям этих признаков. Схема алгоритма приведена на рисунке 38.

Алгоритм №2 представляет собой классификатор по методу наименьшего расстояния. Процесс дифференциации ландшафтных зон с его помощью включает в себя последовательное указание в качестве обучающих выборок профилей РЯТ эталонных участков, расчет координат участков в пространстве информативных признаков и классификацию пикселей вдоль трансекта по методу наименьшего эвклидова расстояния без весовых коэффициентов. В алгоритм также введено дополнительное условие, согласно которому тундровые участки не могут находиться на меньшей широте, чем южная граница тундролесья (что справедливо лишь для района T1, в пределах которого практически не развиты экстразональные тундровые ландшафты, приуроченные к обширным возвышенностям регионального масштаба).

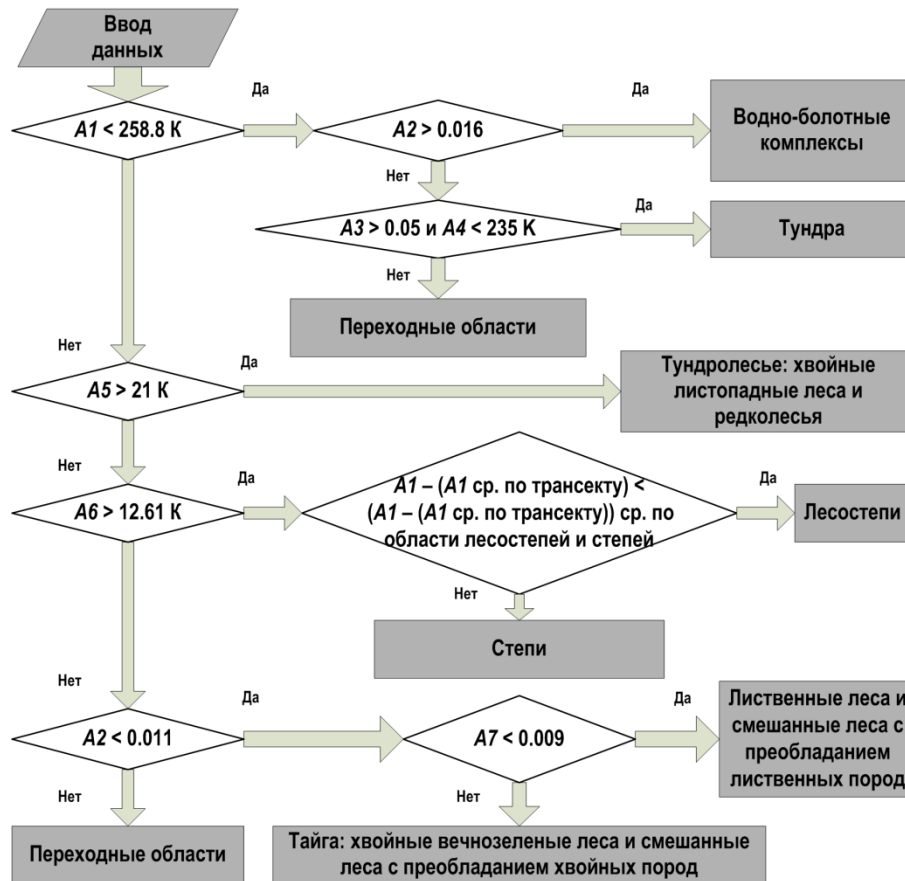


Рисунок 38 – Схема алгоритма №1 последовательной пороговой классификации в виде «дерева решений» для широтно-зональной идентификации ландшафтов природных зон ЗС по набору информативных признаков $A1 - A7$ (описаны в тексте), значения которых рассчитываются по многолетним спутниковым СВЧ данным

Для выбора фиксированных порогов в случае алгоритма №1 и обучения в случае алгоритма №2 используются эталонные участки размером $25 * 25$ км, расположенные в «ключевых» районах вдоль трансектов Т1 и Т2. Координаты участков приведены в таблицах 19 и 20. Каждый из участков представляет определенный ландшафтный тип, которому сопоставлен числовой индекс. В случае трансекта Т1 соответствие между ландшафтными типами и индексами следующее: тундра – 2, тундролесье (хвойные листопадные леса и редколесья) – 3, водно-болотные комплексы – 4, тайга (хвойные вечнозеленые леса и смешанные леса с преобладанием хвойных пород) – 5, листоветные леса и смешанные леса с преобладанием листоветных пород – 6, лесостепи – 7, степи – 8. В случае Т2 тундра обозначена индексом 2, тундролесье – 3, болота – 4, хвойные листопадные леса севера ВС – 5а, хвойные вечнозеленые леса – 5б, хвойные листопадные леса и смешанные леса юга ВС – 5в, листоветные леса – 6. Эталонные участки с индексом 1 относятся к акватории Карского моря и моря Лаптевых соответственно. Выбор эталонных участков производился с опорой на данные карты наземных экосистем Евразии [20], предварительно подвергнутой процедуре генерализации согласно алгоритму, схема которого приведена на рисунке 39. Соотношение площадей,

занимаемых разными типами экосистем в пределах эталонных участков, приведено в таблицах 21 и 22, профили внутригодовой изменчивости РЯТ, зафиксированные для них сенсором AMSR-E в 2008 г., показаны на рисунках 40 и 41.

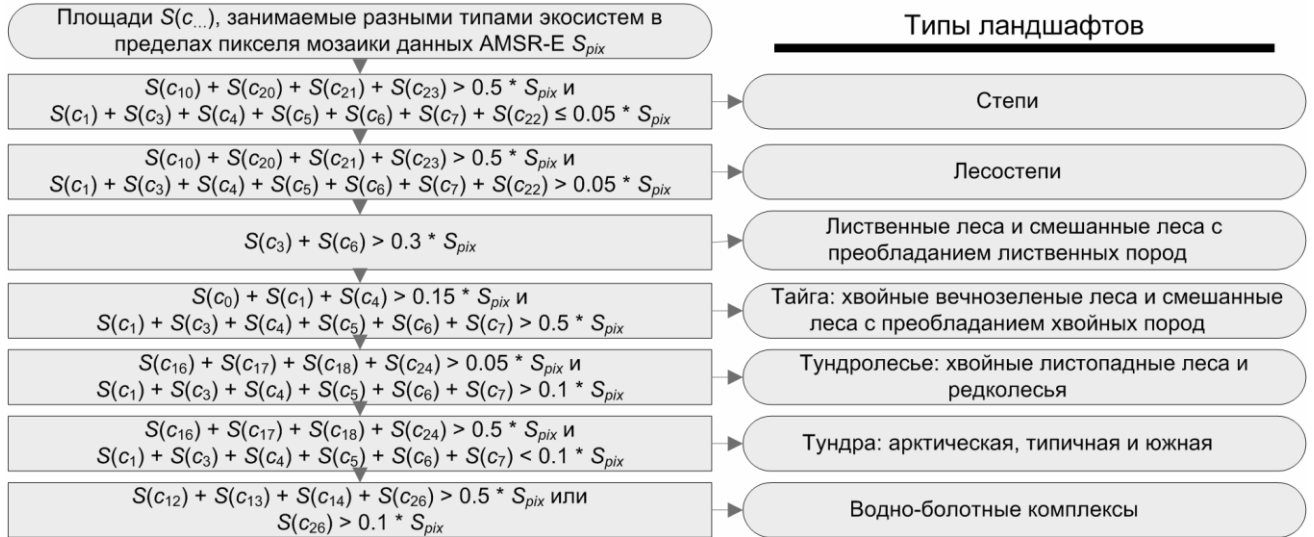


Рисунок 39 – Схема алгоритма генерализации карты наземных экосистем. Идентификаторы ($c_0 - c_{26}$) сопоставлены типам экосистем в таблицах 21 и 22.

Таблица 19 – Географическое положение эталонных участков вдоль трансекта Т1

Индекс эталонного участка	Координаты центра участка	
	Широта	Долгота
2	70° 48'	70° 43'
3	65° 31'	71° 03'
4	62° 04'	70° 58'
5	60° 18'	70° 44'
6	57° 21'	70° 49'
7	55° 34'	70° 36'
8	50° 59'	70° 24'

Таблица 20 – Географическое положение эталонных участков вдоль трансекта Т2

Индекс эталонного участка	Координаты центра участка	
	Широта	Долгота
2	69° 15'	130° 07'
3	67° 17'	129° 44'
4	62° 23'	129° 59'
5а	59° 04'	129° 55'
5б	53° 44'	130° 08'
5в	51° 52'	130° 07'
6	50° 29'	129° 48'

Таблица 21 – Доли площади эталонных участков (%) вдоль трансекта Т1, занимаемые различными экосистемами (по [20])

Типы экосистем	Идентификаторы типов экосистем	Индекс эталонного участка							
		2	3	4	5	6	7	8	
Хвойные вечнозеленые леса	c_0, c_1	-	1	20	20	5	-	-	
Листопадные широколиственные леса	c_3	-	-	-	4	45	10	-	
Смешанные леса с преобладанием хвойных пород	c_4	-	-	-	27	2	-	-	
Смешанные леса	c_5	-	-	-	34	5	-	-	
Смешанные леса с преобладанием лиственных пород	c_6	-	-	-	11	18	1	-	
Хвойные листопадные леса	c_7	-	48	-	-	-	-	-	
Луга	c_{10}	-	-	-	-	6	10	1	
Степи	c_{20}	-	-	-	-	-	-	7	
Болотные комплексы	c_{12}, c_{13}, c_{14}	-	12	58	3	1	-	-	
Травяная тундра	c_{16}	81	-	-	-	-	-	-	
Кустарничковая тундра	c_{17}	11	1	-	-	-	-	-	
Кустарниковая тундра	c_{18}	8	16	1	-	-	-	-	
Сельскохозяйственные угодья	c_{20}	-	-	-	-	1	34	89	
Леса в комплексе с другой естественной растительностью	c_{21}	-	17	1	1	-	-	-	
Леса в комплексе с сельскохозяйственными угодьями	c_{22}	-	-	-	-	8	8	-	
Луга и сельскохозяйственные угодья	c_{23}	-	-	-	-	9	37	3	
Гольцы	c_{24}	-	5	-	-	-	-	-	
Водные объекты	c_{26}	-	-	20	-	-	-	-	

Примечание. «-» – экосистемы данного типа отсутствуют в пределах участка, или площадь, занимаемая ими, составляет менее 1% от площади участка.

Таблица 22 – Доли площади эталонных участков (%) вдоль трансекта Т2, занимаемые различными экосистемами (по [20])

Типы подстилающей поверхности	Идентификаторы типов экосистем	Номер эталонного участка							
		2	3	4	5а	5б	5в	6	
Хвойные вечнозеленые леса	c_0, c_1	-	1	5	1	66	-	-	
Листопадные широколиственные леса	c_3	-	-	4	-	-	6	68	
Смешанные леса с преобладанием хвойных пород	c_4	-	-	1	-	7	-	-	
Смешанные леса	c_5	-	-	1	-	4	-	-	
Смешанные леса с преобладанием лиственных пород	c_6	-	-	1	-	-	-	2	
Хвойные листопадные леса	c_7	5	25	41	98	20	25	2	
Широколиственные листопадные кустарники	c_9	-	-	-	-	-	28	4	
Луга	c_{10}	-	-	4	-	-	32	16	
Степи	c_{20}	-	-	-	-	-	-	-	
Болотные комплексы	c_{12}, c_{13}, c_{14}	-	-	9	-	-	6	-	
Травяная тундра	c_{16}	22	5	-	-	-	-	-	
Кустарничковая тундра	c_{17}	46	14	-	-	-	-	-	
Кустарниковая тундра	c_{18}	22	39	7	-	-	-	-	
Свежие гари	c_{19}	-	-	-	-	2	-	-	
Сельскохозяйственные угодья	c_{20}	-	-	-	-	-	1	-	
Леса в комплексе с другой естественной растительностью	c_{21}	3	11	6	-	-	-	-	
Леса в комплексе с сельскохозяйственными угодьями	c_{22}	2	-	-	-	-	-	6	
Луга и сельскохозяйственные угодья	c_{23}	-	-	-	-	-	2	2	
Гольцы	c_{24}	-	5	2	-	-	-	-	
Водные объекты	c_{26}	-	-	19	1	1	-	-	

Примечание. «-» – площадь, занимаемая экосистемами данного типа, составляет менее 1% от площади участка.

В ходе анализа временной изменчивости РЯТ эталонных участков в разные сезоны были выбраны информативные признаки, позволяющие охарактеризовать наиболее широкий спектр

особенностей годовых рядов РЯТ для соответствующих территорий. Эти признаки были объединены в два конкурирующих набора (A и B). Набор A изначально ориентирован на СВЧ идентификацию с помощью алгоритма №1, B – на идентификацию с помощью алгоритма №2.

Набор информативных признаков A (годовые индикаторы) включает следующие показатели:

- 1) $A1$ ($T_{я6V}^{long-term.ann.av.}$) – усредненные за 2003-2011 гг. значения РЯТ ($f = 6,9$ ГГц, V-поляризация);
- 2) $A2$ ($\sigma(P_{6GHz}^{long-term})$) – значения стандартного отклонения для многолетних рядов коэффициентов поляризации за 2003-2011 гг. ($f = 6,9$ ГГц);
- 3) $A3$ ($P_{6GHz}^{long-term.ann.av.}$) – значения коэффициента поляризации, усредненные за 2003-2011 гг. ($f = 6,9$ ГГц);
- 4) $A4$ ($T_{я6H}^{long-term.ann.av.}$) – усредненные за 2003-2011 гг. значения РЯТ ($f = 6,9$ ГГц, H-поляризация);
- 5) $A5$ ($\sigma(T_{я36V} - T_{я6V})$) – значения стандартного отклонения для многолетних рядов разности между РЯТ на $f = 36,5$ ГГц и РЯТ на $f = 6,9$ ГГц (V-поляризация);
- 6) $A6$ ($\sigma(T_{я6H}^{long-term})$) – значения стандартного отклонения РЯТ для многолетних рядов РЯТ 2003-2011 гг. ($f = 6,9$ ГГц, H-поляризация);
- 7) $A7$ ($P_{6GHz}^{long-term.ann.av.} - P_{36GHz}^{long-term.ann.av.}$) – разность между значениями коэффициента поляризации, усредненными за 2003-2011 гг., на $f = 6,9$ ГГц и $f = 36,5$ ГГц.

Набор информативных признаков B (сезонные индикаторы) включает следующие показатели:

- 1) $B1$ ($T_{я36H}^{jul} / T_{я6H}^{jul}$) – отношение усредненных за июльские даты 2003-2011 гг. РЯТ ($f = 36,5$ ГГц, H-поляризация) к усредненным за июльские даты 2003-2011 гг. РЯТ ($f = 6,9$ ГГц, H-поляризация);
- 2) $B2$ ($T_{я36H}^{jul} / T_{я36H}^{jan}$) – отношение усредненных за июльские даты 2003-2011 гг. РЯТ ($f = 36,5$ ГГц, H-поляризация) к усредненным за январские даты 2003-2011 гг. РЯТ ($f = 36,5$ ГГц, H-поляризация);
- 3) $B3$ ($P_{6GHz}^{jul} / P_{6GHz}^{jan}$) – отношение усредненного за июльские даты 2003-2011 гг. коэффициента поляризации ($f = 6,9$ ГГц) к усредненному за январские даты 2003-2011 гг. коэффициенту поляризации ($f = 6,9$ ГГц);
- 4) $B4$ ($\sigma(T_{я6H}^{mar-jun})$) – стандартное отклонение в рядах значений РЯТ с марта по июнь за 2003-2011 гг. ($f = 6,9$ ГГц, H-поляризация);

- 5) $B5 (T_{я6V}^{jan})$ – усредненные за январские даты 2003-2011 гг. значения РЯТ ($f = 6,9$ ГГц, V-поляризация);
- 6) $B6 (T_{я6V}^{long-term.ann.av.})$ – усредненные за 2003-2011 г. значения РЯТ ($f = 6,9$ ГГц, V-поляризация);
- 7) $B7 (T_{я6H}^{mar-jun.av.})$ – усредненные за март-июнь значения РЯТ для рядов 2003-2011 г. ($f = 6,9$ ГГц, H-поляризация).

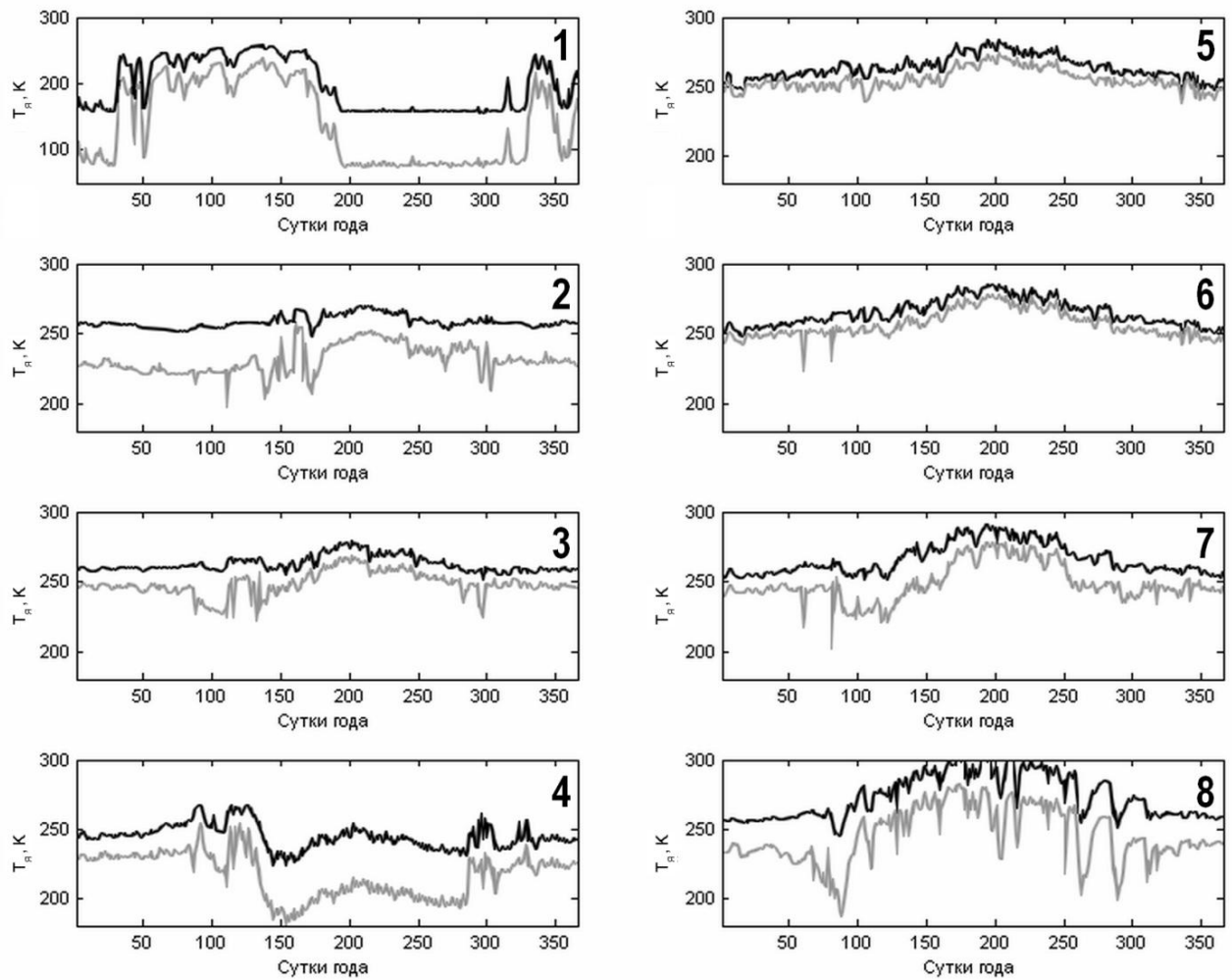


Рисунок 40 – Профили внутригодовой изменчивости $T_{я}$ для эталонных участков, представляющих господствующие типы ландшафтов вдоль трансекта Т1 (AMSR-E, ИСЗ Aqua, $f = 6,9$ ГГц, V- (черный) и H-поляризация (серый), 2008 г.); 1 - 8 – индексы эталонных участков (типов ландшафтов): 1 – акватория Карского моря, 2 – тундра, 3 – тундролесье (хвойные листопадные леса и редколесья), 4 – водно-болотные комплексы, 5 – тайга (хвойные вечнозеленые леса и смешанные леса с преобладанием хвойных пород), 6 – лиственные леса и смешанные леса с преобладанием лиственных пород, 7 – лесостепи, 8 – степи.

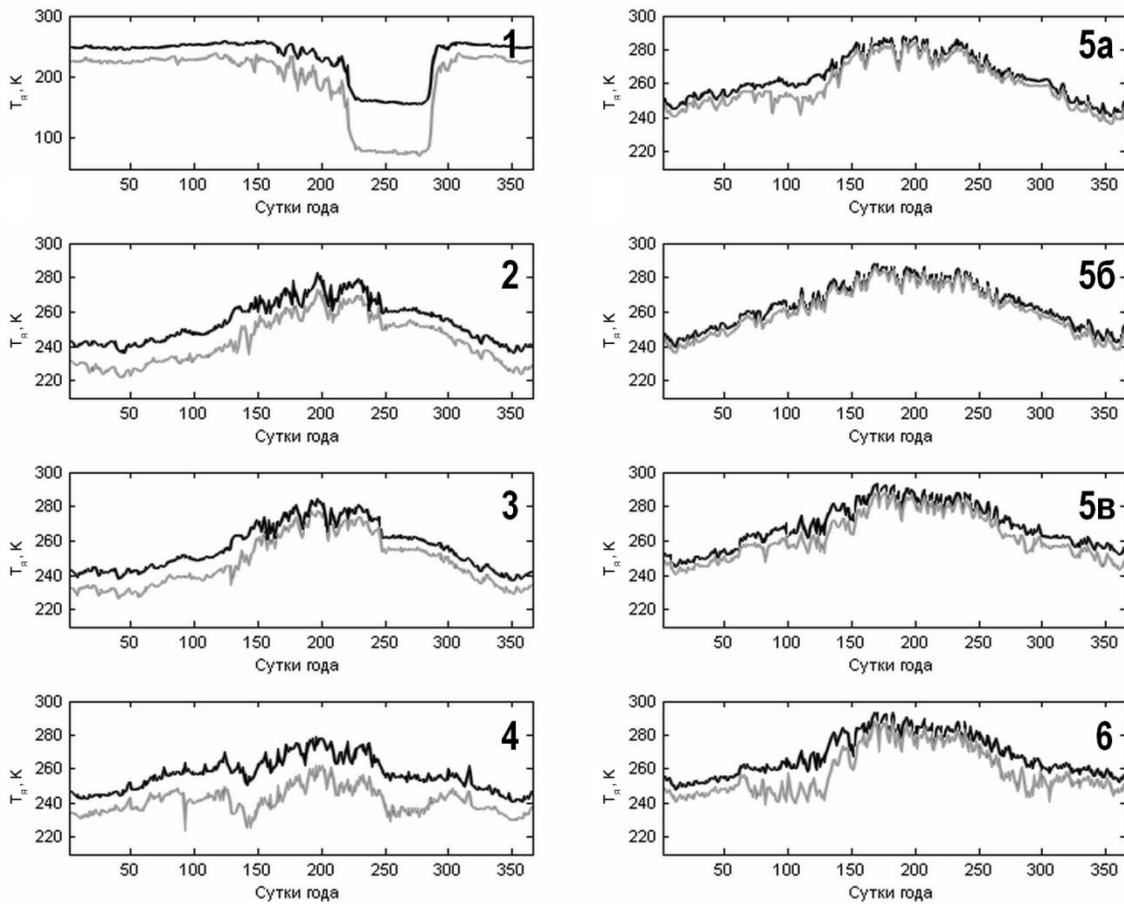


Рисунок 41 – Профили внутригодовой изменчивости T_g для эталонных участков, представляющих господствующие типы ландшафтов вдоль трансекта Т2 (AMSR-E, ИСЗ Aqua, $f = 6,9$ ГГц, V- (черный) и H-поляризация (серый), 2008 г.); 1 - 6 – индексы эталонных участков (типов ландшафтов): 1 – акватория моря Лаптевых, 2 – тундра, 3 – тундролесье, 4 – болота, участки с большим количеством водоемов и водотоков, 5а – хвойные листопадные леса севера ВС, 5б – хвойные вечнозеленые леса, 5в – хвойные листопадные и смешанные леса юга ВС, 6 – лиственные леса

4.1.3 Тестовые испытания алгоритмов и наборов информативных признаков

С помощью алгоритма №2 идентификация ландшафтов выполняется по наборам информативных признаков A и B , с помощью алгоритма №1 – только по набору A . В ходе испытаний при СВЧ дифференциации ландшафтов с помощью алгоритма №2 осуществляется перебор всех возможных комбинаций признаков из наборов A и B , благодаря чему определяются их сочетания, при использовании которых достигается наибольшая эффективность СВЧ идентификации. В результате выявляются наборы признаков, наилучшим образом характеризующие генерализованную ландшафтную структуру на территории ЗС и ВС.

Эффективность выполнения СВЧ идентификации оценивается путем сравнения ее результатов с опорными картографическими данными: картой традиционного ландшафтного

районирования [1], картой земных покровов, составленной по данным спектрорадиометра MODIS в 2001 г. в Бостонском университете [97], и картой наземных экосистем Евразии 2000 г. (TerraNorte), созданной на материалах съемки SPOT4-VEGETATION в ИКИ РАН в сотрудничестве с Объединенным Исследовательским Центром Европейской Комиссии и ЦЭПЛ РАН [20]. Исходя из эффективности СВЧ идентификации для трансектов Т1 и Т2 осуществляется выбор элементов итоговой методики: основного алгоритма автоматизированной классификации, набора информативных признаков, вспомогательных средств обеспечения точности идентификации. Ниже приводится описание хода испытаний и полученных результатов.

В ходе испытаний алгоритма №1 выполнялась корректировка пороговых значений информативных признаков, однако статичная структура «дерева решений» не подвергалась изменениям. В случае алгоритма №2 в процессе перебора разных сочетаний признаков *A1-A7* и *B1-B7* удалось определить наименее информативные и наиболее коррелированные с другими признаками индикаторы, наличие которых в наборе не влияет на эффективность СВЧ идентификации. При их исключении из наборов удалось осуществить сокращение размерности пространств информативных признаков. Из набора *A* были исключены индикаторы *A2, A3, A5, A7*, из набора *B* – *B1, B2, B3*. В итоге пространство информативных признаков в первом случае приведено к трехмерному, во втором – к четырехмерному.

Использование статического дерева решений (алгоритм №1) обеспечивает распознавание границ между традиционно выделяемыми ландшафтными зонами в ЗС, но не позволяет достичь удовлетворительной точности идентификации для ВС даже при существенном изменении пороговых значений информативных признаков. Алгоритм №2 оказался более пригодным для СВЧ идентификации, поскольку обеспечивает удовлетворительное согласие с картой традиционного ландшафтного районирования и одновременно отражает широтное распределение разных типов ландшафтов (земных покровов) по обновленным данным [20] и [97]. В таблице 23 показаны расхождения между результатами СВЧ идентификации, выполненной разными методами, и опорными картами ландшафтного районирования, земных покровов и экосистем для трансекта Т1.

В качестве примера на рисунке 42 приведены полученные в ходе автоматизированной СВЧ идентификации ландшафтов картосхемы широтно-зонального районирования вдоль трансекта Т1. Они показаны в сопоставлении с картой традиционного ландшафтного районирования ЗС и генерализованной картой экосистем (построенной для рассматриваемого трансекта на основе объединения классов исходной карты экосистем Евразии [20]).

Таблица 23 – Доля пикселей, отнесенных к разным типам ландшафтов при идентификации ландшафтов природных зон ЗС вдоль трансекта Т1 разными методами

	Классификация по набору признаков А без обучения (алгоритм №1)	Классификация по набору признаков А с обучением (алгоритм №2)	Классификация по набору признаков Б с обучением (алгоритм №2)	Классическое ландшафтное районирование [1]	Районирование по данным карты наземных экосистем Северной Евразии [20]	Районирование по данным BU-MODIS Land Cover [97]
Классификация по набору признаков А без обучения (алгоритм №1)	0	29,5%	24,8%	21,7%	24,0%	24,0%
Классификация по набору признаков А с обучением (алгоритм №2)	29,5%	0	16,3%	28,7%	24,8%	29,5%
Классификация по набору признаков Б с обучением (алгоритм №2)	24,8%	16,3%	0	22,5%	11,6%	17,1%
Классическое ландшафтное районирование [1]	21,7%	28,7%	22,5%	0	19,4%	29,5%
Районирование по данным карты наземных экосистем Северной Евразии [20]	24,0%	24,8%	11,6%	19,4%	0	12,4%
Районирование по данным карты BU-MODIS Land Cover [97]	24,0%	29,5%	17,1%	29,5%	12,4%	0

Наилучшее согласие обнаруживается между результатами СВЧ идентификации, выполненной с помощью алгоритма №2 по набору признаков Б, и картой наземных экосистем. Получаемый для трансекта Т1 процент расхождения 11,6% отчасти объясняется тем, что ряд участков тайги (хвойных вечнозеленых лесов и смешанных лесов с преобладанием хвойных пород), расположенных на широте $\sim 61.5^\circ$ с.ш., при СВЧ идентификации отнесен к ландшафтной зоне «тундролесье». По мнению автора, это вызвано близостью значений информативных признаков для этих участков к характерным для тундролесья из-за того, что в их пределах распространены несколько типов ландшафтов (болотные комплексы, луга, хвойные и смешанные леса, зоны очагового земледелия) и расположены водные объекты, занимающие не менее 5 % площади. Вследствие существенных отличий СВЧ излучательной способности воды от таковой для других типов земной поверхности даже небольшое количество водных объектов в пределах элемента разрешения может изменить значения РЯТ.

Меньшее согласие результатов СВЧ идентификации и дифференциации традиционному ландшафтному районированию 1983 г. объясняется также спорным положением границы лесостепей/степи на реперной карте ландшафтного районирования. Эта неоднозначность выражена и в несоответствии положению границ между степными и лесостепными участками на указанной карте 1983 г., генерализованной карте наземных экосистем Евразии и глобальной

карте земных покровов. Кроме того, на карте традиционного ландшафтного районирования лесотундра четко отделена от таежной зоны, однако как при генерализации карты экосистем, так и при СВЧ идентификации лесотундра рассматривается как часть ландшафтной зоны тундролесья (лесотундры и северной тайги) – [25, 52], что также ведет к расхождениям.

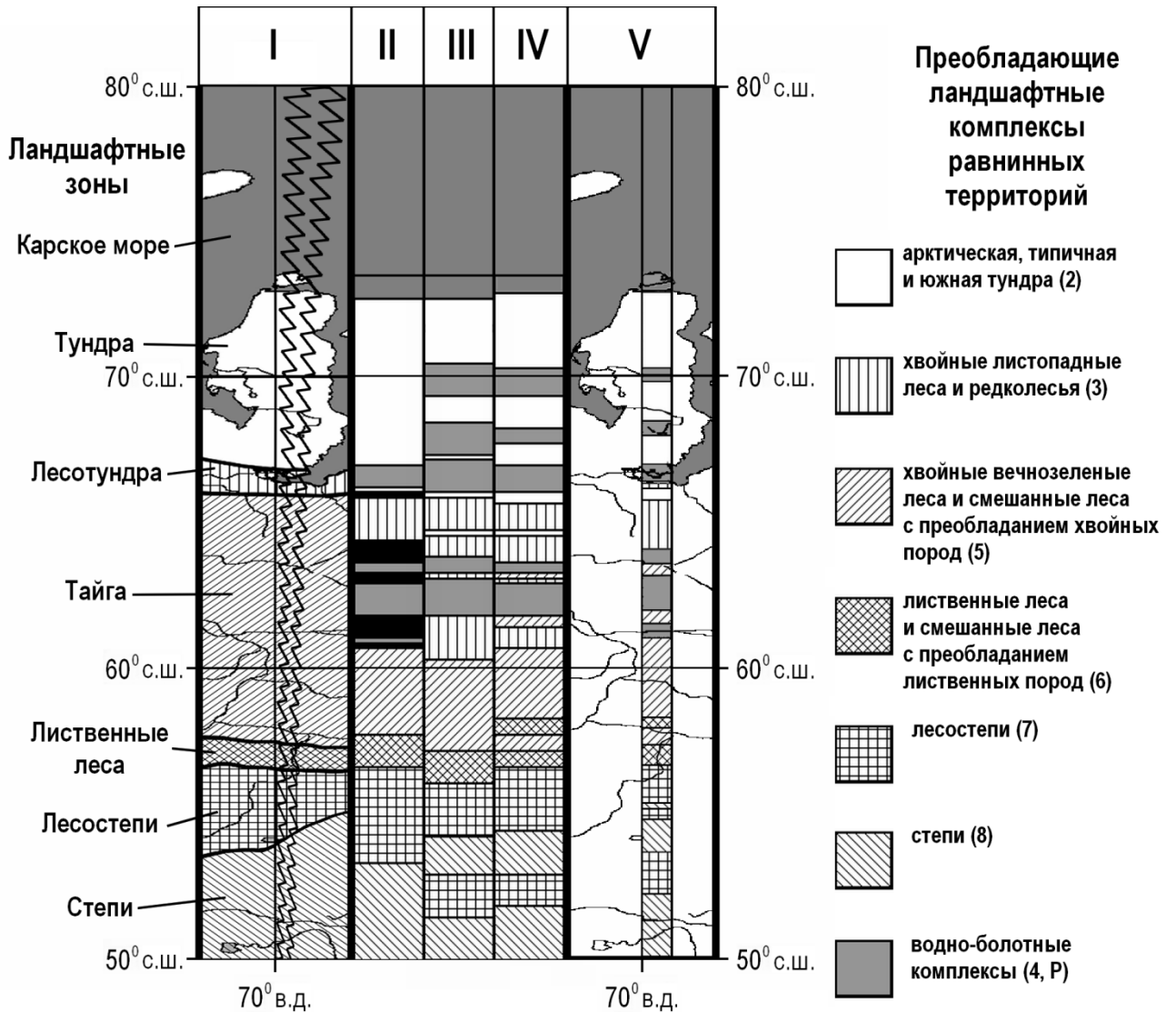


Рисунок 42 – Ландшафтное районирование ЗС вдоль трансекта Т1: I – традиционное классическое по 1; II - IV – результаты автоматизированной идентификации ландшафтных зон по данным спутниковой СВЧ радиометрии (II – по признакам *A1-A7* с помощью алгоритма №1, III – по признакам *A1, A4, A6* с помощью алгоритма №2. IV – по признакам *B4, B5, B6* с помощью алгоритма №2); V – генерализованная карта наземных экосистем. В I тонкой черной линией отмечены границы области (трансекта), в пределах которой проведена идентификация ландшафтов.

В II черным цветом выделены переходные зоны (неклассифицированные участки)

По итогам предварительных испытаний алгоритмов было решено отдать предпочтение алгоритму №2 и набору информативных признаков, состоящему из показателей *B4-B7*.

Выполнение дальнейших работ по СВЧ идентификации ландшафтов основано на использовании полученного комплекта «алгоритм №2 – признаки *Б4-Б7*».

4.1.4 Формирование и испытание результирующей методики автоматизированной СВЧ идентификации ландшафтов

Как было выявлено при испытаниях выбранного комплекта «алгоритм №2 - информативные признаки *Б4-Б6*», диагностическая ценность признаков оказывается неодинаковой при СВЧ идентификации ландшафтов вдоль трансектов Т1 и Т2. При исключении информативного признака *Б5* из набора точность распознавания границ между ландшафтными зонами для Т2 сохраняется в полной мере. Однако признак *Б5* является базовым при СВЧ идентификации ландшафтов ЗС, и его исключение ведет к существенному ухудшению результатов. Одновременно, использование признака *Б7* позволяет достичь максимальной точности распознавания границ в случае Т2, но ухудшает результаты для Т1.

Одним из базовых для СВЧ идентификации ландшафтов при использовании алгоритма №2 является признак *Б6* (он же *А1*) – средние многолетние значения РЯТ на канале 6,9 ГГц при V-поляризации. Лишь при включении этого признака в набор в дополнение к сезонным индикаторам достигается удовлетворительный результат СВЧ идентификации. С помощью признака *Б4*, отражающего вариабельность значений РЯТ ($f = 6,9$ ГГц, Н-поляризация) в весенний период, достигается достаточно четкое разделение степных и лесостепных ландшафтов.

С учетом вышесказанного, итоговый набор признаков, необходимый и достаточный для СВЧ идентификации ландшафтов с точностью 12-13 % вдоль трансекта Т1, включает в себя показатели *Б4, Б5, Б6*, а для трансекта Т2 – *Б4, Б6, Б7*. Таким образом, пространство признаков в обоих случаях сведено к трехмерному. Корреляция между признаками отражена в таблицах 24 и 25.

Невозможность достижения максимальной точности СВЧ идентификации ландшафтов вдоль трансекта Т2 без использования признака *Б7*, предположительно, связана со своеобразием широтного распределения температур приземного слоя воздуха и поверхностного слоя грунта, характеризующего смещение полюса холода к югу от побережья Северного Ледовитого океана. Из-за этого усредненные за январь месяц РЯТ на V-поляризации – *Б5*, – не отражают смену доминирующих ландшафтов вдоль меридиана 130 в.д. Связь между весенними РЯТ на Н-поляризации (*Б7*) и преобладанием определенного типа ландшафта проявляется в данном «ключевом» районе сильнее, поскольку для рельефа на многих его участках характерна

большая расчлененность [131]. Она оказывает влияние на факторы, детерминирующие в первую очередь РЯТ (Н): сроки схода снежного покрова, влажность грунтов, свойства растительности. Изменения геометрии визирования, вызванные обширными возвышенностями, также отражаются в большей степени на Н-поляризации [9].

Типизация ландшафтных зон вдоль трансектов Т1 и Т2, выделенных с помощью алгоритма №2 по информативным признакам из полученных наборов, приведена соответственно в таблицах 26 и 27. Более наглядно относительное положение в пространствах признаков для точек, представляющих конкретные участки вдоль трансектов Т1 и Т2, показано на рисунках 43 и 44.

Таблица 24 – Коэффициенты корреляции между значениями информативных признаков для трансекта Т1

	<i>Б4, К</i>	<i>Б5, К</i>	<i>Б6, К</i>
<i>Б4</i>	1	0,21	0,88
<i>Б5</i>	0,21	1	0,21
<i>Б6</i>	0,88	0,21	1

Таблица 25 – Коэффициенты корреляции между значениями информативных признаков для трансекта Т2

	<i>Б4, К</i>	<i>Б6, К</i>	<i>Б7, К</i>
<i>Б4</i>	1	0,25	0,26
<i>Б6</i>	0,25	1	0,94
<i>Б7</i>	0,26	0,94	1

Таблица 26 – Типизация ландшафтных зон ЗС вдоль трансекта Т1 по информативным признакам из набора *Б* (сезонным индикаторам), использованным для СВЧ идентификации с помощью алгоритма №2 (характерные значения признаков приведены в формате $M \pm \sigma$)

Ландшафтные зоны	Признак		
	<i>Б4, К</i>	<i>Б5, К</i>	<i>Б6, К</i>
2	9,0±0,8	252,0±2,35	253,7±2,9
3	10,7±2,0	255,4±2,10	258,5±3,3
4, P1, P2	15,4±6,0	246,1±3,5	243,3±6,9
5	7,7±1,0	253,7±1,2	261,9±3,1
6	9,3±2,1	255,4±0,7	265,2±1,1
7	17,6±1,9	258,6±0,5	269,6±2,0
8	23,7±1,7	257,5±0,9	271,5±1,3

Таблица 27 – Типизация ландшафтных зон ВС вдоль трансекта Т2 по информативным признакам из набора *Б* (сезонным индикаторам), использованным для СВЧ идентификации с помощью алгоритма №2 (характерные значения признаков приведены в формате $M \pm \sigma$)

Ландшафтные зоны	Признак		
	B_4, K	B_6, K	B_7, K
2	$11,0 \pm 1,3$	$253,3 \pm 3,1$	$239,8 \pm 4,5$
3	$11,1 \pm 1,7$	$257,8 \pm 1,4$	$249,1 \pm 2,8$
4	$6,1 \pm 0,7$	$256,2 \pm 2,0$	$244,1 \pm 2,0$
5a	$11,0 \pm 0,8$	$262,5 \pm 1,4$	$258,4 \pm 2,2$
5б	$10,4 \pm 0,4$	$265,4 \pm 1,0$	$263,6 \pm 0,3$
5в	$10,9 \pm 0,4$	$267,5 \pm 0,6$	$261,1 \pm 1,1$
6	$11,9 \pm 0,9$	$267,4 \pm 0,8$	$257,0 \pm 1,3$

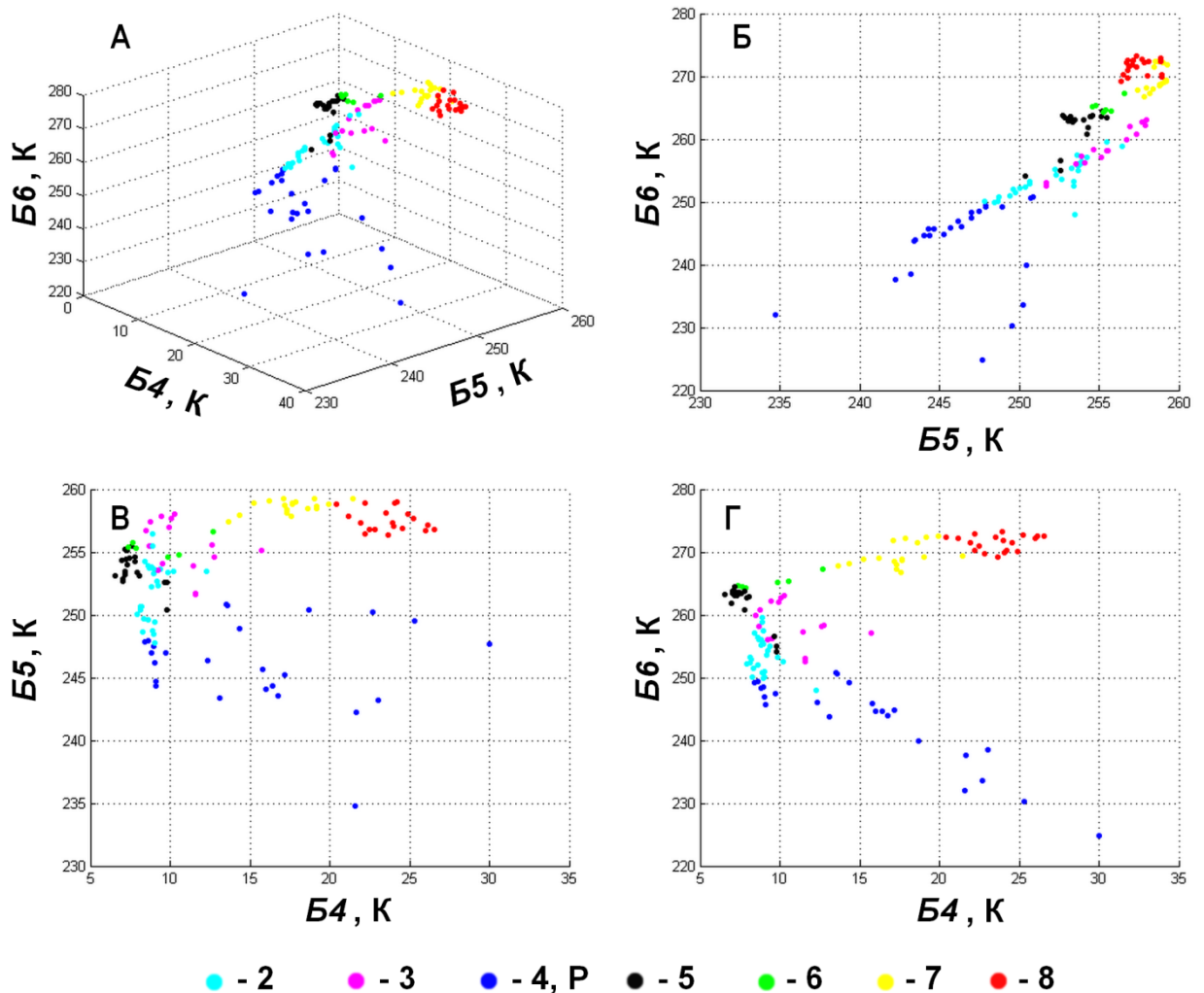


Рисунок 43 – Скаттерограммы в пространствах информативных признаков из набора *Б* для территорий вдоль трансекта Т1 (участкам соответствуют точки, цвета которых обозначают доминирующие типы ландшафтов): А – в трехмерном пространстве, Б-Г – в двумерных пространствах, 2-8 индексы типов ландшафтов (см. текст)

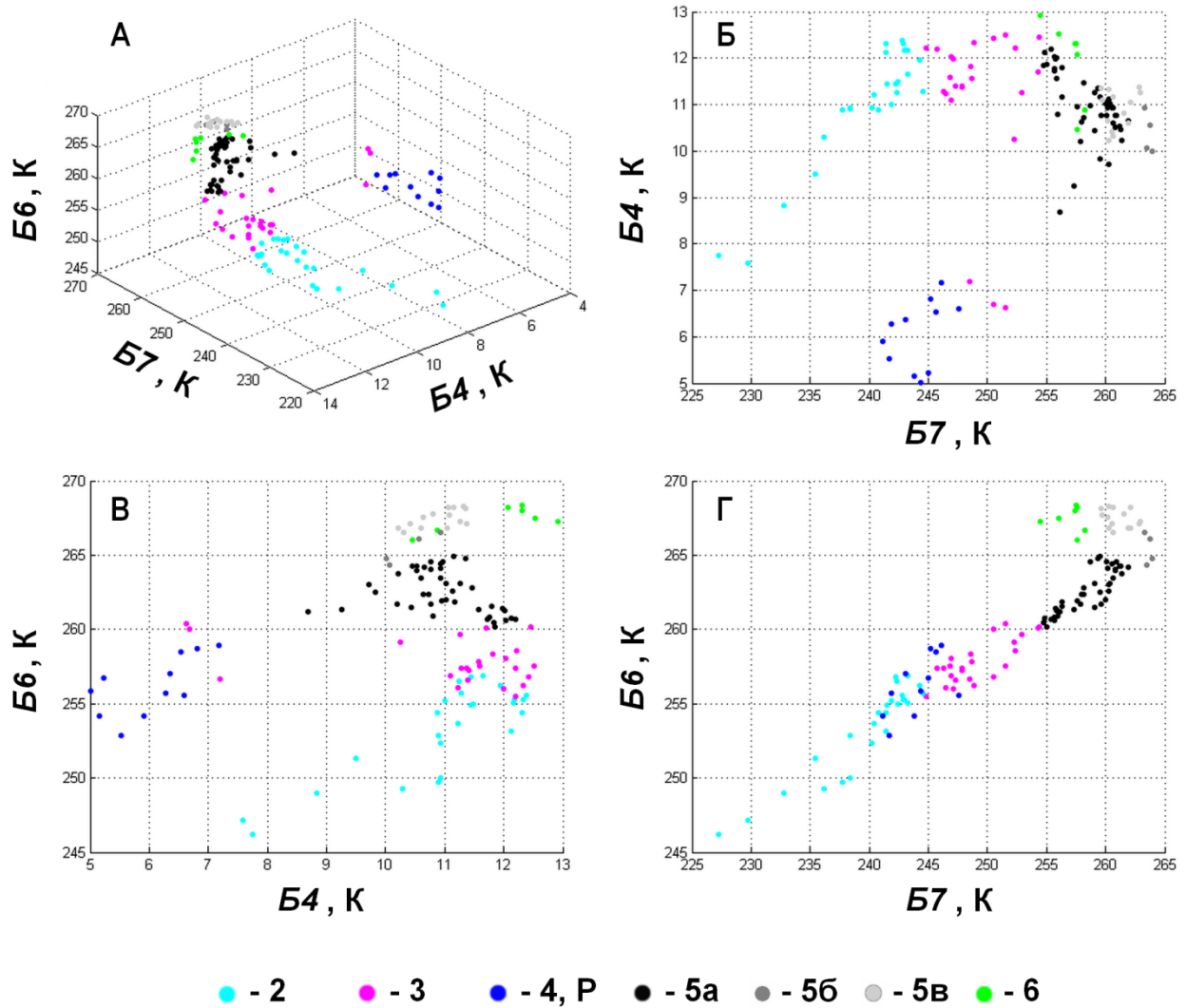


Рисунок 44 – Скаттерограммы в пространствах информативных признаков из набора *B* для территорий вдоль трансекта Т2 (участкам соответствуют точки, цвета которых обозначают доминирующие типы ландшафтов): А – в трехмерном пространстве, Б-Г – в двумерных пространствах, 2-6 индексы типов ландшафтов (см. текст)

Как показывает анализ, наличие водных объектов в пределах участков суши оказывает существенное влияние на результаты СВЧ идентификации. При генерализации карты экосистем автором было задано условие, согласно которому участки, более 10% площади которых занято водотоками, водоемами и болотами, считаются территориями с преобладанием водно-болотных комплексов (4, P). В ходе классификации с помощью алгоритма №2 к ландшафтным типам 4, P отнесены и участки, где доля открытой водной поверхности значительно меньше.

Для учета влияния водных объектов на значения РЯТ участков вдоль трансекта Т1 и осуществления СВЧ идентификации ландшафтов на участках, где площадь водных объектов превышает 1-2%, был выполнен ряд дополнительных расчетов. В качестве северного и южного реперов, задающих внутригодовые и межгодовые изменения РЯТ открытой водной поверхности, был выбран участок в Обской губе и участок в юго-западной (пресноводной)

части акватории оз. Балхаш. Значения РЯТ водоемов в разные даты для участков ЗС вдоль Т1 были получены интерполяцией реперных значений РЯТ по широте, так как близких по размеру к области мгновенного обзора СВЧ радиометра водоемов в данной части Евразии не было обнаружено.

Среднесуточные значения РЯТ суши внутри участков, соответствующих элементам разрешения сенсора или пикселям мозаики РЯТ, рассчитываются по формуле:

$$T_{\text{я.ландш.}} = \frac{T_{\text{я}\Sigma} - T_{\text{я.водн.}} \cdot S_{\text{водн.}}}{(1 - S_{\text{водн.}})}, \quad (32)$$

где $T_{\text{я.ландш.}}$ – РЯТ поверхности суши с исключенными водными объектами, $T_{\text{я}\Sigma}$ – результирующая РЯТ излучающей системы, $S_{\text{водн.}}$ – суммарная доля площади, занимаемая водными объектами в пределах участка, $T_{\text{я.водн.}}$ – интерполированное значение РЯТ водной поверхности.

В качестве источника информации о площади, занимаемой водными объектами внутри отдельных пикселей сетки EASE grid, была выбрана карта распределения водных объектов, составленная по данным спектрорадиометра MODIS в 2001 г. в Бостонском университете [97]. Для массивов СВЧ данных, полученных в ходе внесения поправок в исходные значения РЯТ, были вычислены значения описанных информативных признаков Б4-Б6. Далее СВЧ идентификация проведена с помощью алгоритма №2.

Для трансекта Т1 результаты СВЧ идентификации и дифференциации, проведенной по скорректированным значениям РЯТ, отражают традиционное ландшафтное районирование несколько лучше, чем полученные по исходным данным. Однако для полноценного испытания алгоритма и анализа применимости выбранного способа учета влияния водоемов на РЯТ было принято решение произвести СВЧ идентификацию ландшафтов на всей территории ЗС.

Картосхема, отражающая результаты СВЧ идентификации, выполненной на материале архива СВЧ данных с сенсора AMSR-E за 2003-2011 гг., представлена на рисунке 45 (а – с выделением водно-болотных комплексов и водных объектов в отдельный тип ландшафтов 4,Р и без внесения поправок на водную поверхность в РЯТ, б – с внесением поправок в РЯТ). Как видно из приведенных изображений, во втором случае, несмотря на сопоставление наиболее обводненным участкам ландшафтных типов, хорошо согласующихся с типами экосистем согласно [20] на субпиксельном уровне, на значительной части ЗС вечнозеленые таежные леса неверно классифицированы как лиственные (в основном в западных районах). Участки вечнозеленых хвойных лесов практически не распознаются и в пределах ЕТР. Данный факт не позволяет использовать скорректированные значения РЯТ для СВЧ идентификации ландшафтов без повышения точности описания временной изменчивости РЯТ водной поверхности для

водных объектов в разных физико-географических областях и требует дальнейшей адаптации алгоритма к региональным особенностям ландшафтной структуры территорий. Оставляет желать лучшего и точность СВЧ идентификации в горных областях.

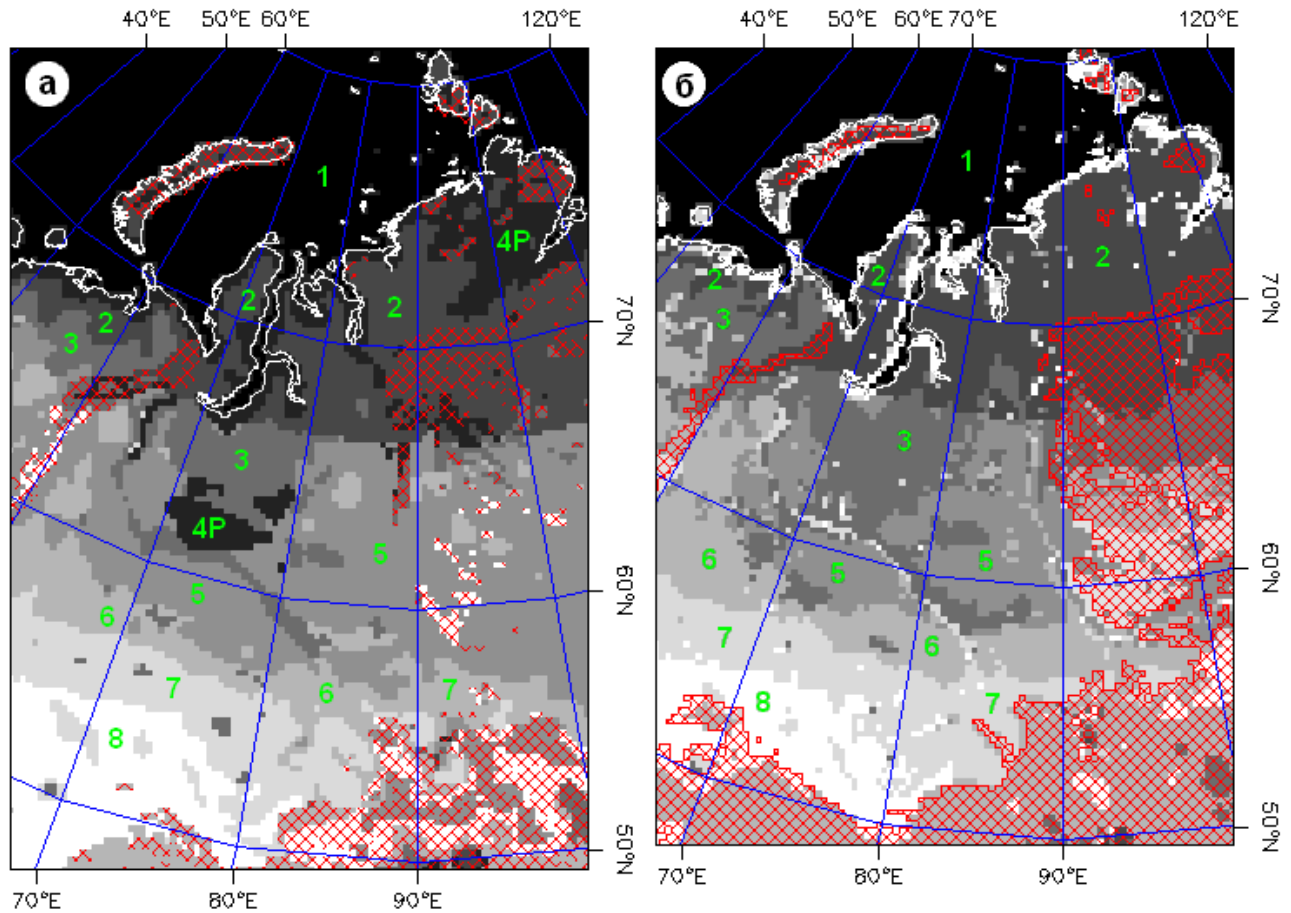


Рисунок 45 – Результаты СВЧ идентификации ландшафтов ЗС с помощью алгоритма №1 по набору информативных признаков СВЧ излучения подстилающей поверхности без коррекции влияния водной поверхности на РЯТ (а) и с коррекцией (б). Цифрами обозначены индексы типов ландшафтов, красная сетка охватывает районы с уклонами $> 0,2$ (а) и с уклонами $> 0,2$ и высотами более 250 м (б))

На основе полученных результатов тестовых испытаний была создана итоговая методика СВЧ идентификации и дифференциации ландшафтов Северной Евразии. Процесс районирования в ней представляется последовательностью из шагов:

- 1) Выбор эталонных участков, представляющих генеральные типы ландшафтов в основных физико-географических странах (целесообразно отдельно рассматривать ЕТР, ЗС, ВС и Дальний Восток);
- 2) Вычисление значений информативных признаков Б4, Б5, Б6 для равнинных и Б4, Б6, Б7 для горных областей по многолетним рядам РЯТ $f = 6,9$ ГГц с сенсоров AMSR-E / AMSR-2;

- 3) Классификация участков по методу наименьшего расстояния на основе значений выделенных признаков с помощью алгоритма №2;
- 4) Распознавание участков, характеризующихся значениями признаков на границах между классами и установление «буферных» зон в пространстве признаков между классами;
- 5) Выявление участков с долей площади, занимаемой водными объектами, более 10%;
- 6) Создание результирующей карты СВЧ идентификации ландшафтов и оценка ее качества.

Для выявления участков, имеющих СВЧ излучательные свойства, близкие к свойствам эталонных тундровых участков, была выполнена СВЧ идентификация ландшафтов евразийского сектора Арктики. Идентификация осуществлялась с некоторыми отступлениями от полученной методики: в качестве эталонов использовались лишь участки вдоль трансектов Т1 и Т2, буферные зоны не устанавливались. Результаты СВЧ идентификации представлены на рисунке 46.

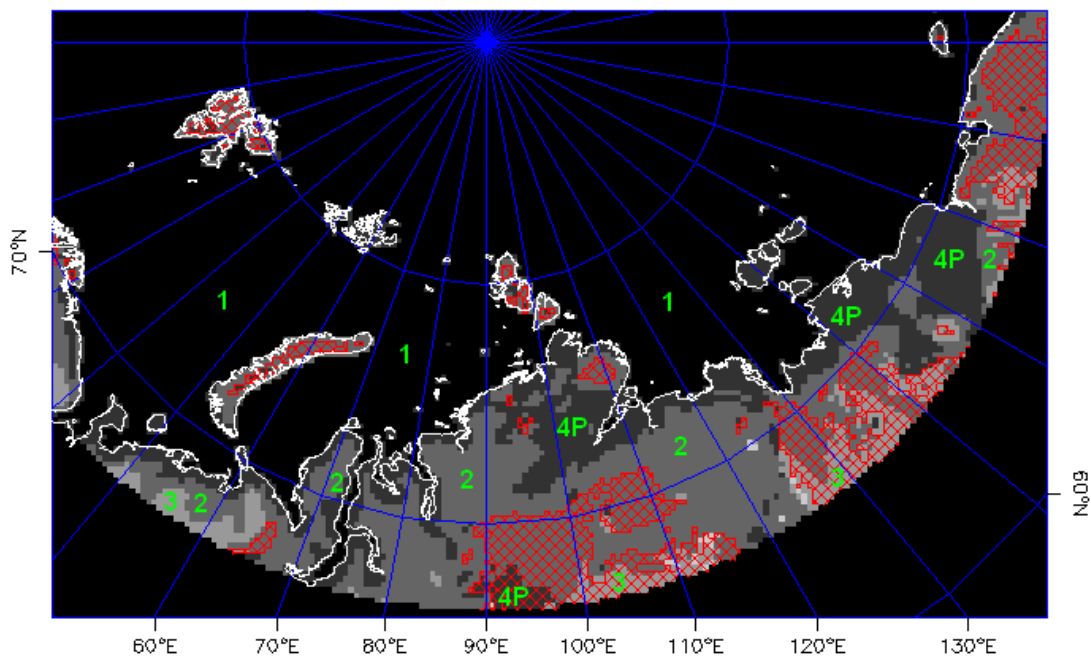


Рисунок 46 – Результаты СВЧ идентификации ландшафтов евразийского сектора Арктики, полученные с помощью алгоритма №1 без коррекции влияния на РЯТ водных объектов (красная сетка ограничивает районы с уклонами $> 0,2$ и высотами более 250 м)

Как видно из изображения, основную часть суши Арктики занимают территории с типичными для тундр (арктических, кустарничковых, травяных) СВЧ излучательными

свойствами. Именно в данной области Арктики, по заключению автора, разработанный метод оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов может быть использован с сохранением точности, достигнутой в экспериментах по валидации для тестовых тундровых участков У1-У3. За пределами обозначенной области характер внутригодовой изменчивости излучательных свойств существенно отличается от зафиксированного для тундровых участков, что не позволяет рекомендовать разработанный метод к использованию в других ландшафтных зонах без дополнительных испытаний с привлечением опорных данных наземных измерений.

Стоит отметить значительные по площади районы на севере ЗС и ВС, классифицированные как водно-болотные комплексы. Причиной отнесения данных территорий к указанному типу является большое количество водных объектов в их пределах, а также (для ряда участков ВС) низкие зимние T_{gp} и, соответственно, РЯТ. При восстановлении значений параметров состояния грунтов на этих территориях по спутниковым СВЧ радиометрическим данным следует обязательно учитывать наличие водных объектов. На ЕТР участки кустарниковой тундры отнесены к ландшафтному типу «лесотундра», что связано с использованием эталонов из ЗС.

4.2 Апробация разработанного метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов на территории полуострова Ямал

Апробация разработанного метода оценки межгодовой изменчивости состояния мерзлых грунтов была выполнена на материале архива данных СВЧ радиометра AMSR-E за 2003-2011 гг. в одном из районов Арктики, «ключевых» для мониторинга мерзлых грунтов – в ЗС (подробное описание климатических и геофизиологических условий района приведено в разделе 2.2). Изменчивость состояния мерзлых грунтов в указанном временном интервале была оценена для расположенного в западной части ЗС п-ова Ямал, где ММГ наиболее чувствительны к климатическим изменениям.

В первую очередь в соответствии с разработанной методикой был выполнен предварительный анализ спутниковых СВЧ радиометрических данных, для чего построены картосхемы пространственно-временной изменчивости РЯТ вдоль трансекта 70 °в.д. в 2003-2011 гг. Ниже подробно рассмотрен типовой пример визуальной оценки и интерпретации радиояркостных контрастов в поле картосхемы пространственно-временной изменчивости РЯТ в 1-181 сутки 2008 г. (рисунок 47). При этом рассмотрены особенности изменения РЯТ как на участках, относящихся к Арктике, так и лежащих значительно южнее в других ландшафтных зонах.

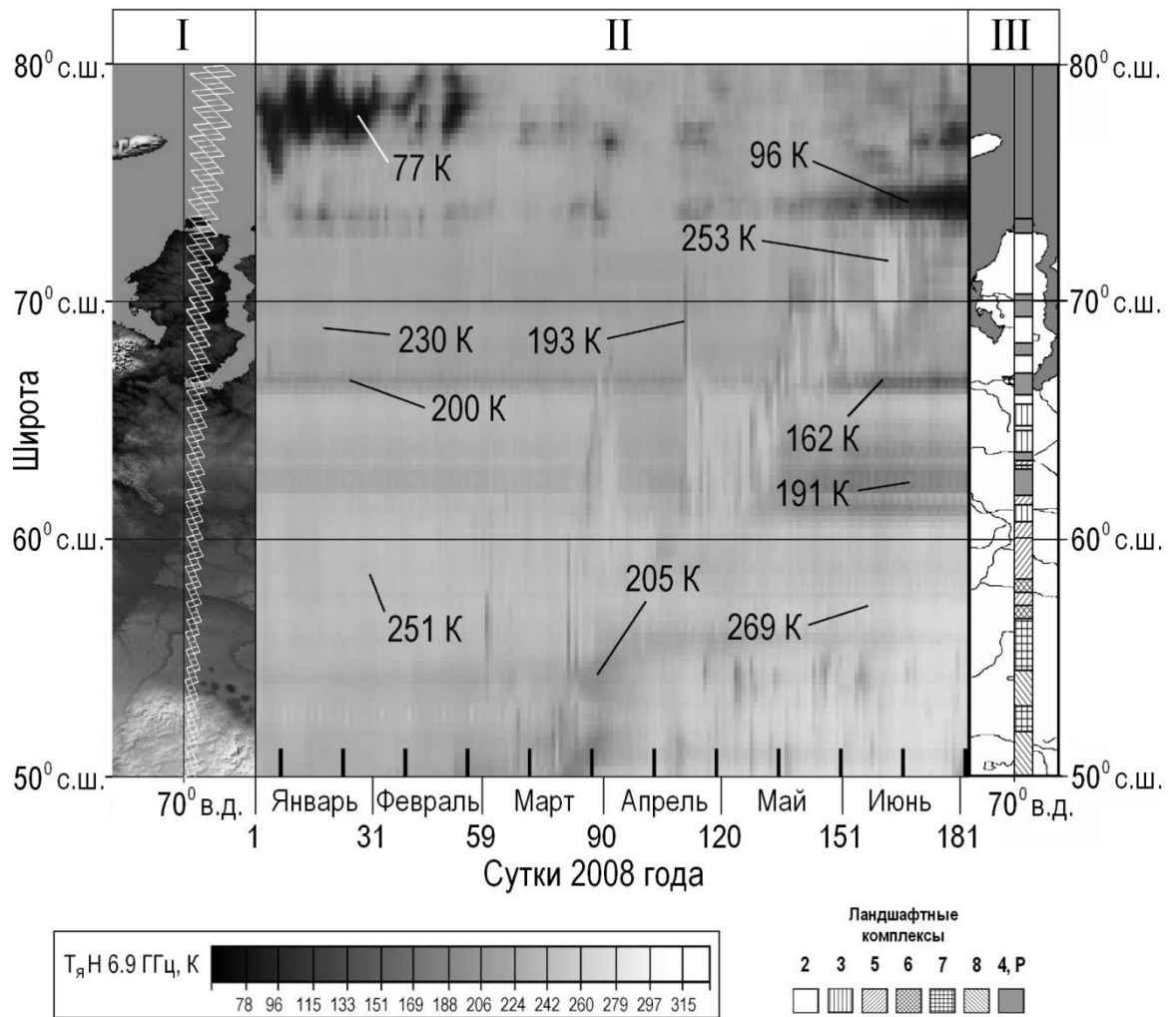


Рисунок 47 – Картограмма пространственно-временной изменчивости РЯТ многослойных сред вдоль трансекта Т1: 2008 г., ИСЗ «Аква», AMSR-E, $f = 6,9$ ГГц, H -поляризация. I – географическое положение исследуемого трансекта; II – поле пространственно-временного распределения РЯТ; III – результаты СВЧ идентификации и дифференциации ландшафтов ЗС и Северного Казахстана.

Участки земной поверхности, маркированные индексом 1 в соответствии с принятой в разделе 4.1 легендой, относятся к акватории Карского моря. Как видно из рисунка 47, существенная разница излучательной способности воды и морского льда в СВЧ диапазоне создаёт условия для диагностики процессов лёдообразования, фиксации моментов появления участков открытой воды и изменения ледовых условий [23, 31, 96]. Так, в зимние и весенние месяцы чётко распознаются области пониженных РЯТ, периодически возникающих к северу от о. Белый на широтах $73,5^{\circ}$ - 74° с.ш. и вблизи мыса Желания (76° - 79° с.ш.). По заключению автора, они соответствуют времени образования квазистационарных полыней.

На долготе трансекта южная граница тундровой зоны (2) практически совпадает с границей области непрерывного распространения ММГ и границей Арктики. Согласно

полученным картограммам, для всех тундровых участков рассматриваемого трансекта четко выделяются 4 периода внутригодовой изменчивости состояния грунтов А, В, С, D.

В период А в тундре радиояркие контрасты по пространственной и временной осям малы, наблюдается стабильная картина плавных колебаний РЯТ, связанных преимущественно с изменениями $T_{зр}$. Оттепели в начале периода В, проявляющиеся в резком понижении РЯТ, фиксируются на юге п-ова Ямал (южнее 70° с.ш.) на несколько суток раньше, чем на севере, а в отдельные даты охватывают тундровую зону трансекта целиком.

Обращает на себя внимание разница в поведении РЯТ в отдельных точках п-ова Ямал в вегетационный период С. В точках с широтой $67,5^\circ$ с.ш., 70° с.ш., $71,25^\circ$ с.ш. наблюдается уменьшение РЯТ до уровня 200 К и ниже, что связано в первую очередь с наличием водоемов в границах рассматриваемых участков. По данному уменьшению в поле картограммы мы можем идентифицировать сроки освобождения этих водоемов ото льда (для северных участков смещенные в сторону более поздних дат в сравнении с участками, лежащими южнее). На типичных для тундровой части трансекта участках с меньшей площадью водных объектов наблюдается обратная картина: в летний период РЯТ повышаются.

В начале периода D в рассматриваемой зоне трансекта детектируются кратковременные резкие скачки РЯТ, вызванные циклическими процессами замерзания-оттаивания, схожие с опознаваемыми в апреле-мае. В других зонах трансекта подобные скачки РЯТ в осенние месяцы значительно менее выражены. По картограммам пространственно-временной изменчивости РЯТ может быть четко опознано и становление ледового покрова на реке Обь, в акватории Карского моря и в зоне 4 на широте $62-63^\circ$ с.ш.

Участки хвойных вечнозеленых лесов, соответствующие ландшафтной зоне 5, отличаются максимально высокими на протяжении годового цикла значениями РЯТ. По мнению автора, это связано с круглогодичным присутствием хвойного покрова. Даже в период интенсивного весеннего таяния РЯТ практически не снижается. Из этого следует важный методологический вывод: рассматриваемую часть трансекта можно круглогодично использовать в качестве «чёрного тела» для дальнейшего развития и совершенствования метода «внешней» калибровки спутниковой СВЧ аппаратуры, широко использовавшегося ранее при проведении СВЧ съёмки с борта самолёта-лаборатории ГГО Ил-18 [23].

Для территорий с преобладанием ландшафтного типа 3 чётко прослеживается значительный контраст между весенними и летними значениями РЯТ. Доминирующая древесная порода на указанном участке трансекта – лиственница. В работах [43, 49] отмечается ведущая роль крон деревьев в формировании суммарного СВЧ излучения многослойной среды грунт–травяная растительность–лес–атмосфера. Поскольку лиственница сбрасывает хвою на зиму, то в весенний период её хвойный покров не участвует в формировании СВЧ излучения

многослойной среды, что вызывает снижение экранирующего влияния слоя растительности. В результате этого становится возможным на $f = 6,9$ ГГц фиксировать весенние понижения РЯТ, обусловленные процессами таяния снежного покрова, оттаивания грунтов и выпадением жидких осадков. В летний же период развитые кроны со зрелой хвоей обеспечивают высокие значения РЯТ, не позволяя картировать изменения в состоянии грунтов на рассматриваемой частоте зондирования [19]. Указанные территории вдоль трансекта рекомендуется использовать в качестве «чёрного тела» для калибровки СВЧ аппаратуры лишь в летний период. Сходными профилями внутригодовой изменчивости РЯТ, но с более выраженным уменьшением РЯТ в период В годового цикла, обладают и участки, на которых доминирующими ландшафтными комплексами являются лиственные леса (зона б).

Ландшафтная зона 4 (Р), обнаруживаемая спутниковой аппаратурой по контрасту её излучательных СВЧ свойств с соседними областями 3 и 5, соответствует районам с максимальным распространением водно-болотных комплексов. В весенние месяцы для данной широтной зоны СВЧ съёмкой чётко фиксируются периоды таяния снежного покрова и оттаивания грунтов. Основное отличие этих районов от смежных широтных областей – изменчивость РЯТ в летний период, когда достигается максимум площади открытой водной поверхности, а грунты находятся в стабильно талом состоянии. В это время года измеренные значения РЯТ указанного района лежат в пределах 195–210 К.

Лесостепи, разнотравные и сухие степи юга Западносибирской низменности (ландшафтные зоны 7 и 8) характеризуются глубоким и продолжительным (15-20 суток) снижением РЯТ до значений 165 К в апреле-мае, что может служить индикатором интенсивного таяния снега и насыщения влагой грунтов. Для этих областей не удалось четко выделить период стабильно мерзлого состояния грунта, поскольку и в зимние месяцы в данных районах имеют место частые оттепели, вызывающие резкое уменьшение РЯТ.

На всех картосхемах за 2003-2011 гг. в весенне-летний период наблюдается чётко выраженный продолжительный максимум РЯТ (повышение РЯТ относительно среднего зимнего уровня до некоторой отметки, за которой следует затяжное падение РЯТ в результате таяния). Рассматривая РЯТ как произведение коэффициента излучения и $T_{гр}$, можно определить, что повышенные РЯТ в период D возможны при одновременном выполнении условия максимума излучательной способности многослойной среды (вследствие преимущественно мёрзлого состояния грунтов и снежного покрова) и условия максимальной близости ее усредненной термодинамической температуры к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наметив границы указанного интервала, названного автором интервалом «максимальной термодинамической температуры мёрзлого состояния ландшафтов» (см. раздел 3.3), в пространственно-временных координатах, можно получить важную климатологическую СВЧ характеристику исследуемого региона. По

протяженности интервала и его сдвигу вдоль временной оси картосхемы можно судить об интенсивности теплопереноса в весенний период того или иного года на разной широте. Данная особенность годового хода РЯТ хорошо прослеживается на рисунке 47.

Особенности внутригодовой изменчивости РЯТ, выявленные по картосхемам пространственно-временной изменчивости РЯТ в ходе предварительного анализа СВЧ радиометрических данных, позволили сформулировать следующие первичные выводы и рекомендации:

1. Характер временной изменчивости РЯТ, свойственный участкам трансекта 70 в.д. с преобладанием ландшафтного типа «тундра» и малой площадью водных объектов, максимально близок к отмеченному для тестовых участков У1 и У2, что позволяет ожидать высокой точности определения значений индикаторов в ходе автоматизированной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов по данным СВЧ радиометрии на территории п-ова Ямал;
2. Значительный радиояркий контраст в начале января 2008 г., предположительно связанный с наступлением оттепели, фиксируется в поле картосхемы лишь для южной части п-ова Ямал. По мнению автора, в связи с этим требуется дополнительная проверка результатов автоматизированного распознавания границ периодов внутригодовой изменчивости для 2008 г. во избежание ложного срабатывания детектора границ или «пропуска цели» в разных частях п-ова.
3. Участки с большой площадью водных объектов или малым расстоянием от береговой линии Северного Ледовитого океана обладают СВЧ сигнатурами, существенно отличающимися от типичных для ландшафтных зон, в которых они находятся. Исходя из сложности учета влияния открытой водной поверхности на СВЧ излучательные свойства участков (см. раздел 4.1), для уменьшения вероятности ошибок при автоматизированной оценке изменчивости состояния мерзлых грунтов было принято решение исключить из дальнейшего анализа территории с преобладанием водно-болотных комплексов 4 (Р) (согласно результатам СВЧ идентификации ландшафтов);

Межгодовые контрасты РЯТ, фиксируемые в период стабильно мерзлого состояния грунтов А, четко прослеживаются по картосхемам среднемесячных январских и февральских значений РЯТ вдоль трансекта Т1 (рисунок 48). Из представленных изображений видно, что положение максимумов и минимумов среднемесячных РЯТ на временном интервале 2003-2010 г. различается как между ландшафтными зонами, так и внутри этих зон. Ранг суровости зимних месяцев 2003-2011 гг. по усредненным за январь значениям РЯТ для территорий вдоль Т1 и Т2, относящихся к Арктике и расположенных за ее пределами, отличается от их ранга по

усредненным за февраль РЯТ. В частности, обращают на себя внимание контрасты среднемесячных РЯТ между 2006 и 2007 гг., имеющие разные знаки для января и февраля. Однако, согласно данным Росгидромета, эти годы вполне определенно соотносятся друг с другом по среднегодовым температурам: 2006 г. является экстремально холодным, 2007 г. – экстремально теплым [15].

Для более подробной иллюстрации различий годового хода РЯТ в годы с контрастными среднегодовыми температурами и зимами различной суровости на рисунке 49 представлены картосхемы пространственно-временной изменчивости РЯТ (Н-поляризация) вдоль трансекта Т1 в 2006 и 2007 г. Согласно рисунку, в Арктике, несмотря на более ранние оттепели, в 2007 г. период С начался позже, чем в 2006 г., Для ландшафтных зон, находящихся за пределами Арктики, начало периода С в 2007 г. сдвинуто в сторону более ранних дат по сравнению с предыдущим годом. По картосхемам видно, что в тундровой зоне в вегетационный период (С) 2007 г. значения РЯТ на большинстве временных интервалов превышают отмеченные для тех же дат 2006 г., что соответствует взаимному положению рассматриваемых лет в рейтинге среднегодовых температур по данным отчетов о климате Росгидромета [15].

В этап предварительного анализа СВЧ данных был дополнительно включен расчет коэффициентов линейных трендов РЯТ на $f = 6,9$ ГГц, усредненных за временные интервалы с 1 января по 28 (29) февраля каждого календарного года. Такой интервал осреднения позволяет более полно охарактеризовать зимние сезоны в целом и одновременно исключить из оценки периоды, в которые значения коэффициентов излучения грунтов Арктики могут меняться в более широких пределах (декабрь, март). Кроме того, тот же интервал временного осреднения используется для определения значений индикатора изменчивости состояния мерзлых грунтов $Иг_2$.

Коэффициенты линейных трендов усредненных за январь-февраль РЯТ $a^{тренд\ РЯТ}$ при аппроксимации межгодовых изменений для периода 2003-2011 гг. показаны на рисунке 50. Как видно из рисунка, для территорий Арктики вдоль трансекта Т1 наблюдается слабо выраженный отрицательный тренд изменений РЯТ, что позволяет предположить наличие незначительной тенденции к уменьшению температур мерзлых грунтов п-ова Ямал в масштабах десятилетия. Если рассматривать трансект целиком, то положительная направленность межгодовых изменений январских-февральских РЯТ фиксируется лишь для участков в ландшафтных зонах 4, Р с доминированием водно-болотных комплексов. Для ландшафтной зоны 3 (тундролесье) на Т1 зафиксированные тренды РЯТ отрицательны.

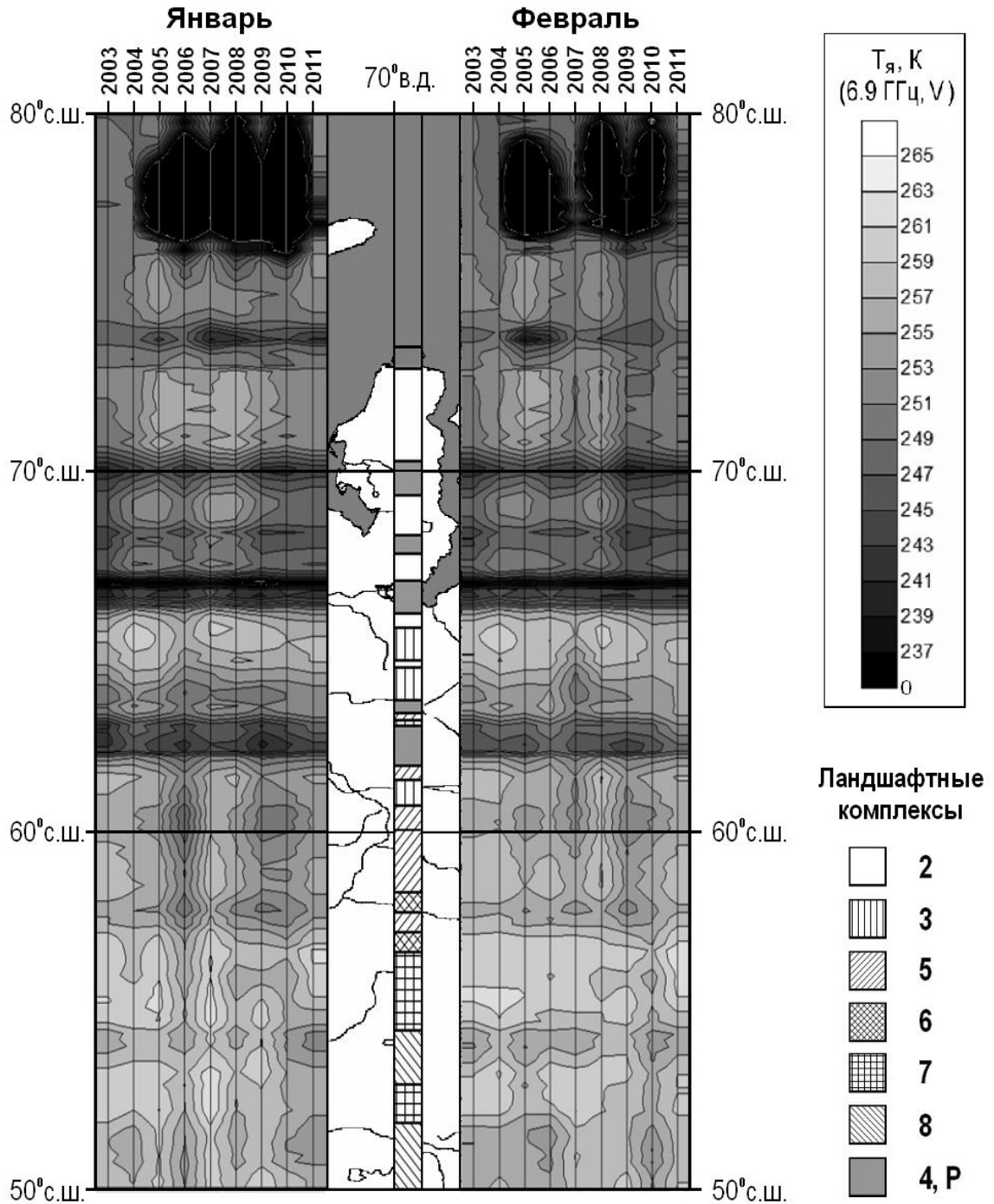


Рисунок 48 – Картосхема межгодовой изменчивости среднемесячных январских и февральских РЯТ (ИСЗ «Аqua», AMSR-E, $f = 6,9$ ГГц, вертикальная поляризация) для участков земной поверхности вдоль трансекта 70° в.д. в сопоставлении с полученным в ходе автоматизированной СВЧ идентификации ландшафтным районированием ЗС: 2 – тундра, 3 – тундролесье (хвойные листопадные леса и редколесья), 4, P – водно-болотные комплексы, 5 – тайга (хвойные вечнозеленые леса и смешанные леса с преобладанием хвойных пород), 6 – лиственные леса и смешанные леса с преобладанием лиственных пород, 7 – лесостепь, 8 – степь

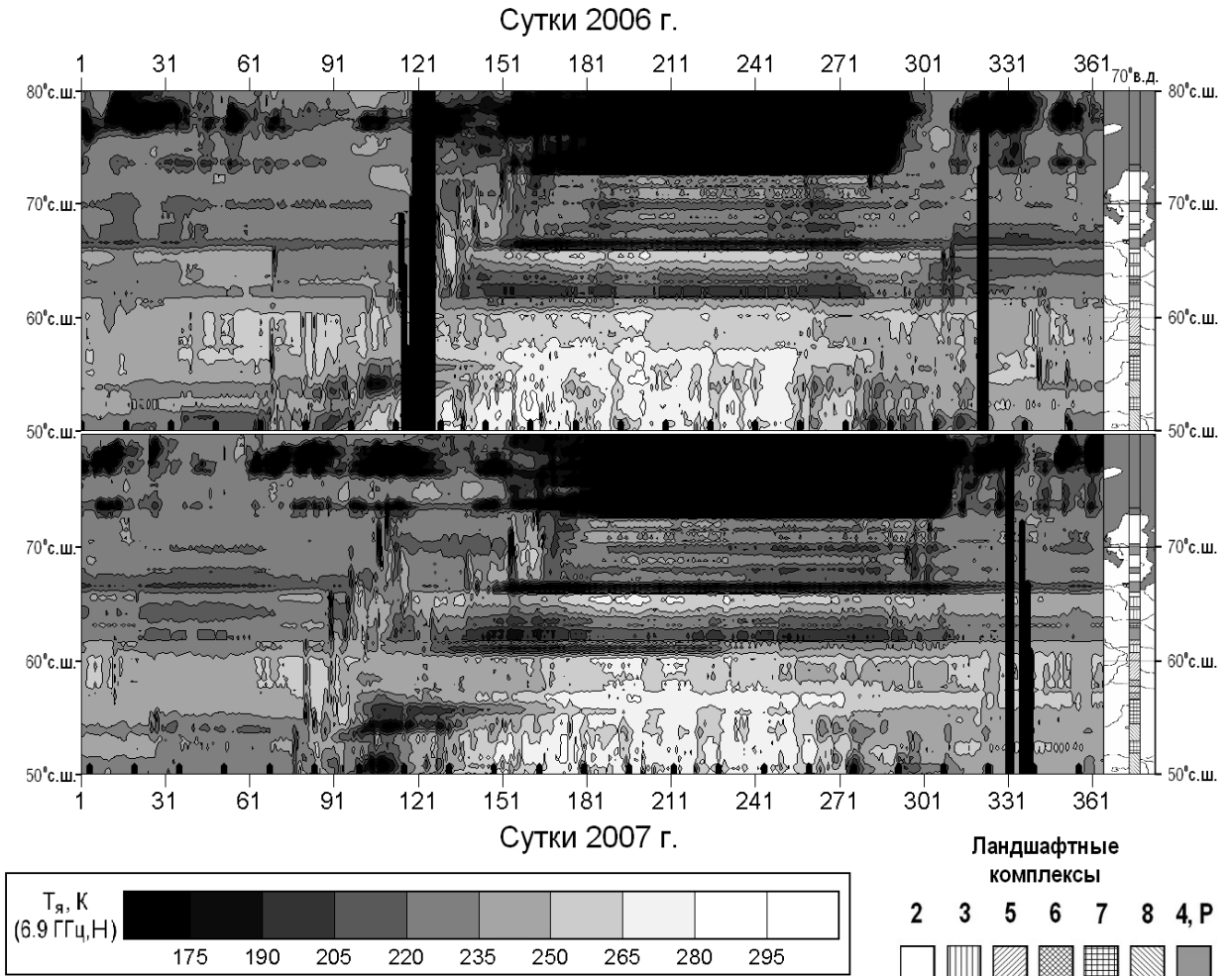


Рисунок 49 – Сравнительное сопоставление картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ вдоль трансекта 70° в.д. в 2006 и 2007 гг. (ИСЗ Aqua, AMSR-E, $f=6,9$ ГГц, Н-поляризация)

На участках с преобладанием ландшафтного типа 5 выявлен отрицательный тренд изменения усредненных за январь-февраль РЯТ. В данной зоне на $f=6,9$ ГГц вклад излучения крон деревьев в суммарное СВЧ излучение многослойной среды максимален на протяжении всего годового цикла, и изменения РЯТ вследствие малой вариабельности коэффициентов излучения лесного полога отражают прежде всего колебания термодинамической температуры крон, тесно связанной с $T_{возд}$ [43]. Поскольку корреляция между РЯТ и температурой воздуха в данных зонах максимальна – см. таблицу 28, то, судя по динамике РЯТ, можно сделать вывод о наличии тенденции к понижению усредненных за январь-февраль $T_{возд}$ в период 2003-2011 гг.

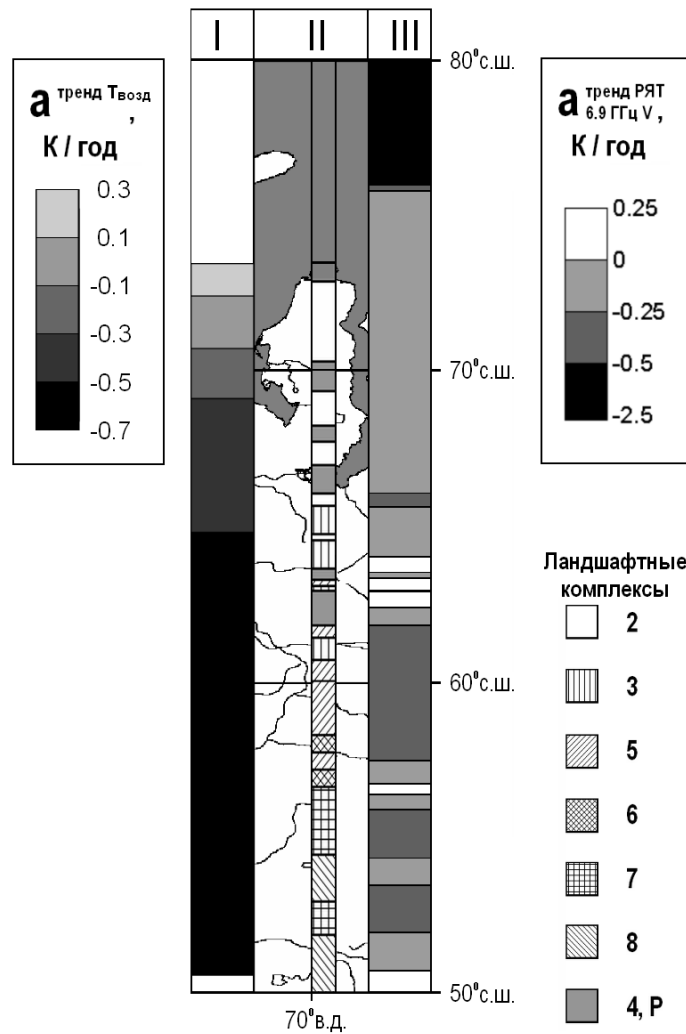


Рисунок 50 – Широтное распределение значений коэффициентов линейных трендов $a^{\text{тренд } T_{\text{возд}}}$ (I) и $a^{\text{тренд РЯТ}}$ (III) для 2003-2011 гг., рассчитанных по усредненным за январь-февраль $T_{\text{возд}}$ и РЯТ соответственно, соотнесенное с результатами СВЧ идентификации и дифференциации ландшафтов вдоль трансекта Т1 (II)

С целью установления соответствия между направленностью изменений РЯТ и $T_{\text{возд}}$ в зоне 5 на временном интервале 2003-2011 г. для территорий вдоль трансекта Т1 были рассчитаны коэффициенты линейного тренда $T_{\text{возд}}$, усредненных за январь-февраль каждого года (рисунок 50). Значения $T_{\text{возд}}$ для территорий между ГМС были восстановлены путем линейной интерполяции по данным для ГМС, расположенных вдоль трансекта Т1: им. Попова, Марре-Сале, Салехард, Ханты-Мансийск, Тобольск, Исилькуль, Караганда.

По данным наблюдений за $T_{\text{возд}}$ на ГМС за 9 лет также выявляется отрицательный тренд изменения температуры воздуха в зоне 5 ЗС. Данный факт подтверждает высокую информативность РЯТ на $f = 6,9$ ГГц и V-поляризации, усредненных за январь-февраль, при использовании данного параметра в качестве индикатора климатической изменчивости.

Таблица 28 – Значения коэффициентов корреляции $r_{0,02}$ между рядами $T_{я}$ и $T_{возд}$ за 2003-2011 гг. для участков на разной широте вдоль трансекта Т1 при разной частоте зондирующего сигнала (значимые коэффициенты выделены полужирным шрифтом)

Широта, °с.ш.	Тип ландшафта	$T_{я}$ ($f = 6,9$ ГГц, V) и $T_{возд}$	$T_{я}$ ($f = 36,5$ ГГц, V) и $T_{возд}$
73,4	4	-0,78	-0,25
72,7	2	-0,57	0,83
71,9		0,49	0,84
71,2		0,55	0,86
70,5		0,61	0,84
69,7		4	0,07
69,0	2	0,43	0,86
68,3		0,24	0,85
67,6		0,21	0,85
66,8	4	-0,06	0,87
66,1		-0,10	0,89
65,4	3	0,80	0,90
64,6	2	0,48	0,89
63,9	3	0,41	0,86
63,2	5	0,37	0,91
62,5	4	-0,05	0,83
61,7		0,53	0,89
61,0	3	0,19	0,79
60,3	5	0,91	0,96
59,5		0,89	0,93
58,8		0,86	0,94
58,1	6	0,86	0,93
57,4	5	0,89	0,92
56,6	7	0,86	0,89
55,9		0,78	0,88
55,2		0,79	0,88
54,4	8	0,76	0,85
53,7		0,82	0,88
53,0	7	0,87	0,92
52,3		0,87	0,90
51,5		0,84	0,87
50,8	8	0,82	0,87
50,1		0,84	0,88

Представленные трендовые оценки получены на основе коротких рядов усредненных за январь-февраль значений РЯТ (9 лет). Значения коэффициента детерминации R^2 для незначительного количества участков достигает 0,4-0,50, для большинства участков $R^2=0,01-0,2$. При уровне надежности 90% согласно результатам F-теста достоверной можно считать линейную аппроксимацию лишь для 5% участков вдоль трансекта Т1. Таким образом, полученные трендовые оценки пока не позволяют сделать надежные выводы о тенденциях изменений $T_{зр}$ и $T_{возд}$. При продолжающемся пополнении рядов СВЧ измерений на $f = 6,9$ ГГц данными с СВЧ радиометра AMSR-2 в перспективе стоит ожидать увеличения достоверности оценок направленности изменений $T_{зр}$ и $T_{возд}$ по 6,9 ГГц СВЧ данным.

В ходе автоматизированной оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов, выполненной с помощью разработанного метода, были восстановлены значения индикаторов

внутригодовой и межгодовой изменчивости (*И1с-И3с, И1г-И3г*). Полученные значения были использованы для определения тенденций изменения состояния мерзлых грунтов на интервале 2003-2010 гг. (2011 г., как год окончания нормального функционирования СВЧ радиометра AMSR-E, не включен в статистику, т.к. значения отдельных индикаторов не удалось восстановить по неполному годовому ряду РЯТ).

В первую очередь были восстановлены значения индикатора $И1с - T_{gp}$ для территории п-ова Ямал в периоды А и В 2003-2010 г. На рисунке 51 представлена подборка полученных в результате картосхем пространственного распределения T_{gp} . Как видно из рисунка, для отдельных территорий в одни и те же сутки периода А (в примере – 11 марта) в годы с зимами разной суровости T_{gp} может отличаться на 5-10 К.

За неимением данных площадных контактных измерений T_{gp} в качестве опорной информации о пространственном распределении термодинамической температуры излучающей поверхности были использованы данные с теплового канала спектрорадиометра MODIS, установленного на ИСЗ Aqua и осуществляющего измерения температуры излучающей поверхности $T_{ик}$ в попутном режиме по отношению к СВЧ радиометру AMSR-E. Сшитые в мозаику и перепроецированные автором данные MODIS LST показаны на рисунке 52 в виде картосхем распределения $T_{ик}$ в пределах п-ова Ямал. Сравнивая рисунки 51 и 52, можно заметить сходство картин пространственной изменчивости T_{gp} и $T_{ик}$ 11 марта 2005 и 2008 гг. Для 2006 г. структура пространственной изменчивости двух указанных параметров существенно отличается, для 9-13 марта 2007 г. информация о $T_{ик}$ с MODIS недоступна из-за облачности.

Расхождения между абсолютными значениями T_{gp} и $T_{ин}$, пространственное распределение которых показано на картосхемах, обусловлены в первую очередь тем, что для построения карт $T_{ин}$ в рассматриваемые даты использованы данные ночной съемки MODIS (~ 3-4 ч по местному времени), а для картосхем T_{gp} – данные с AMSR-E с восходящих витков ИСЗ Aqua (~ 12-14 ч по местному времени). Кроме того, причиной возникновения различий является и разница толщины слоя среды, формирующего излучение в случае ИК и СВЧ диапазона. В зимне-весенний период спектрорадиометр фиксирует прежде всего излучение снежного покрова, в то время как СВЧ радиометр на $f = 6,9$ ГГц принимает сигнал от грунтов, практически не экранированный снегом. Температура же данных двух слоев многослойной среды может значительно отличаться [54].

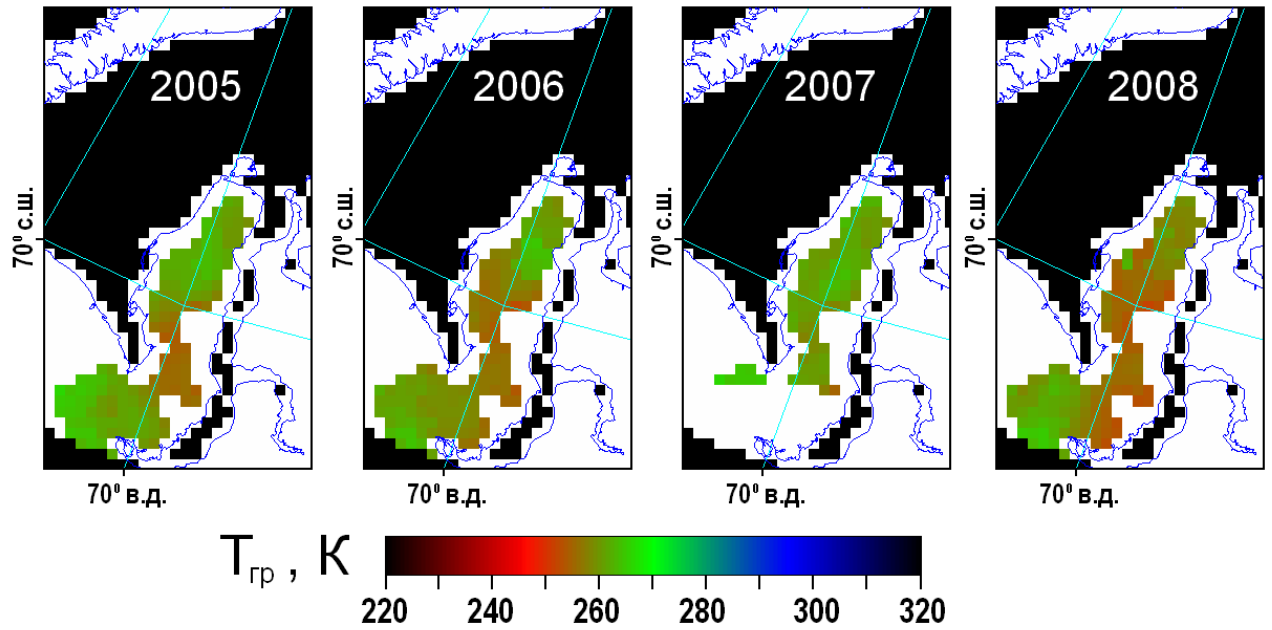


Рисунок 51 – Картограммы пространственного распределения $T_{гр}$ для территорий п-ова Ямал, относящихся к ландшафтному типу 2, восстановленных по данным AMSR-E для 11 марта 2005-2008 г.

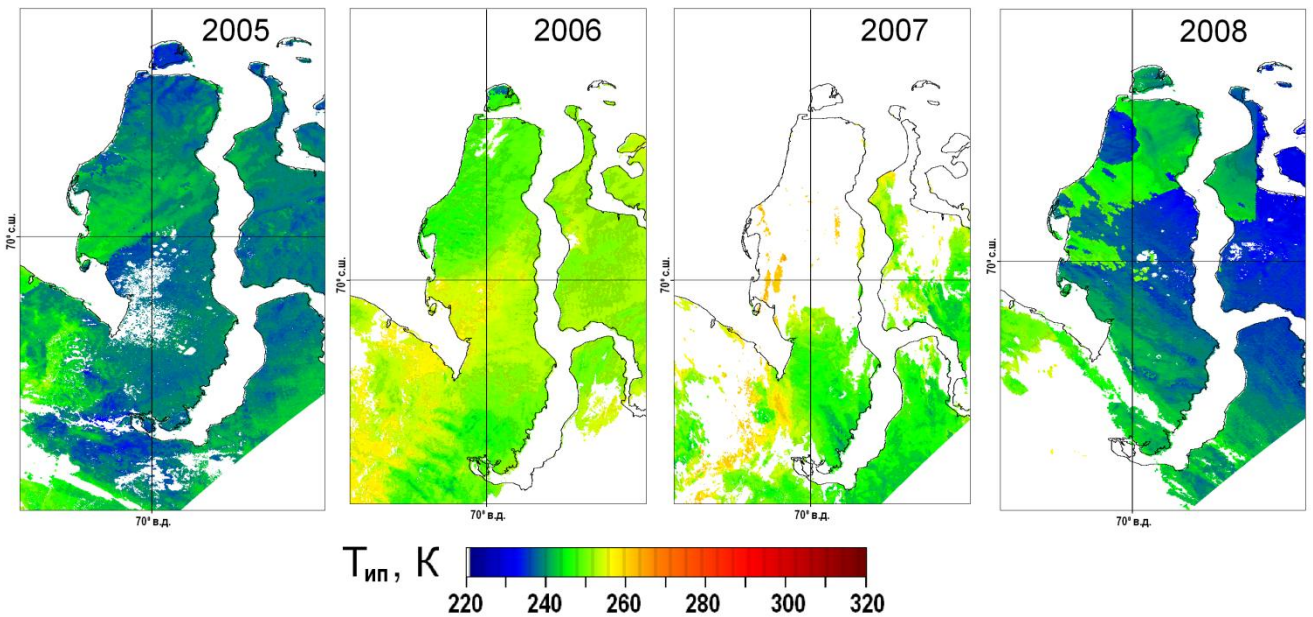


Рисунок 52 – Картограммы пространственного распределения температуры излучающей поверхности ($T_{ип}$) на п-ове Ямал 11 марта 2005-2008 гг. по данным MODIS LST [113]

Для получения значений индикатора III_2 восстановленные по СВЧ данным $T_{гр}$ (рисунки 53 и 54) были усреднены за временные интервалы с 1 января по 28 (29) февраля каждого года. Кроме того, для получения интегральных оценок изменчивости состояния грунтов на региональном уровне было выполнено усреднение $T_{гр}$ по территории п-ова Ямал для участков, отнесенных к ландшафтному типу 2 (тундра). Вычисленные таким образом значения были

сопоставлены с усредненными за январь-февраль значениями $T_{гр}$ и $T_{возд}$, измеренными на площадках ГКС и ГМС Марре-Сале.

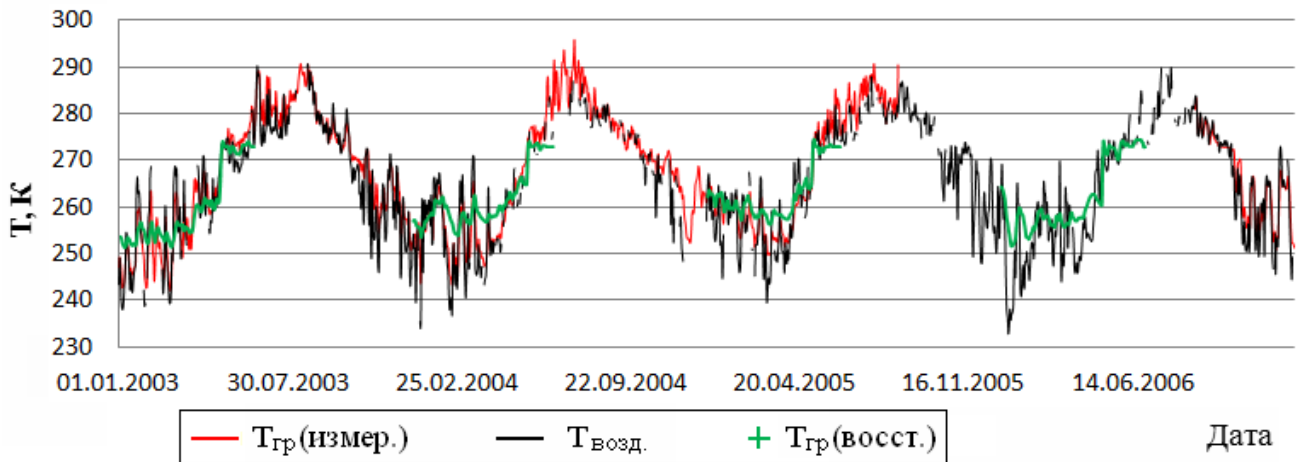


Рисунок 53 – Межгодовая изменчивость усредненных по территории п-ова Ямал $T_{гр}$, восстановленных по данным AMSR-E, в 2003-2006 гг., и их сопоставление с данными об изменчивости $T_{гр}$ и $T_{возд}$, полученными по результатам измерений на ГКС и ГМС Марре-Сале

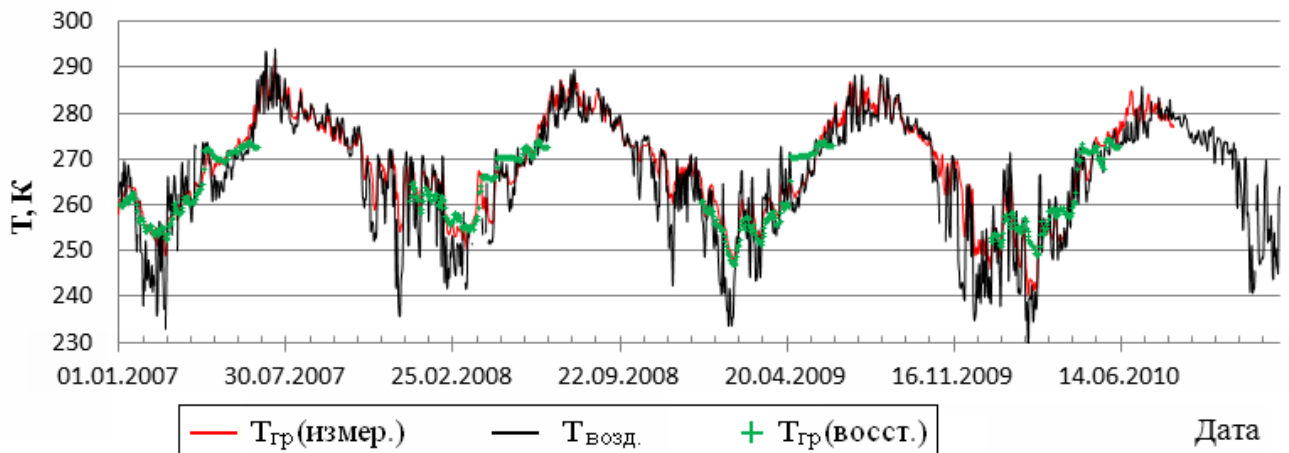


Рисунок 54 – Межгодовая изменчивость усредненных по территории п-ова Ямал $T_{гр}$, восстановленных по данным AMSR-E, в 2007-2010 гг., и их сопоставление с данными об изменчивости $T_{гр}$ и $T_{возд}$, полученными по результатам измерений на ГКС и ГМС Марре-Сале

Восстановленные $T_{гр}$ проявляют слабо выраженную отрицательную динамику во временном интервале 2003-2010 гг. (см. рисунок 55). При значениях коэффициента детерминации R^2 величиной менее 0,1 линейную аппроксимацию данной временной зависимости нельзя считать достоверной. Ход усредненных восстановленных $T_{гр}$ на большей части исследуемого временного отрезка практически повторяет ход $T_{возд}$, измеренных на ГМС Марре-Сале, с поправкой на относительное смещение 3-6 К. Как и следовало ожидать, расхождения между восстановленными и измеренными $T_{гр}$ оказались меньше, чем

расхождения между восстановленными T_{gp} и $T_{возд}$. Тем не менее, усредненные за январь-февраль восстановленные значения T_{gp} в 2003-2005 гг. отличаются от измеренных T_{gp} на 1-3 К в большую сторону, в 2007-2009 гг. – в меньшую.

Более подробное рассмотрение динамики восстановленных T_{gp} для участков, расположенных в разных частях п-ова Ямал, для которых управляющими командами алгоритма априорно заданы отличающиеся друг от друга свойства грунтов (согласно карте плотности, представленной на рисунке 29), показало, что коэффициенты линейных трендов в большинстве случаев (81%) отрицательны, при этом коэффициент детерминации для 98% участков не превышает 0,1. Таким образом, для периода с 2003 по 2011 гг. значимые тенденции к увеличению температур мерзлых грунтов на севере ЗС не были выявлены, что подтверждает выводы, сделанные в ходе предварительного анализа СВЧ радиометрических данных (оценки динамики усредненных за январь-февраль РЯТ). Усредненные для временного интервала январь-февраль значения СКО для пространственной выборки восстановленных значений T_{gp} за рассматриваемые 8 лет меняются в широких пределах (рисунок 56). Это свидетельствует о сложной структуре пространственной изменчивости и нелинейной динамике данного параметра.

С помощью разработанного программно-алгоритмического обеспечения было определено положение границ периодов внутригодовой изменчивости состояния грунтов на п-ове Ямал. На основе результатов распознавания границ этих периодов были найдены значения индикаторов $I2g$ и $I3g$. Усредненное по территории п-ова Ямал положение границ периодов А-Д в 2003-2010 гг. показано на рисунке 57. Как видно из приведенного изображения, на указанном восьмилетнем интервале наблюдается тенденция к более раннему началу периода В ($R^2 = 0,28$). При этом сроки начала и окончания вегетационного периода С, согласно результатам расчетов, в рассматриваемой временной промежуток менялись в небольших пределах. Сдвиг границы А|В в сторону более ранних дат в 2008 г., обусловивший существенное уменьшение значений $I2g$, вызван явлениями оттепелей в январе данного года, отмеченными в южной части п-ова Ямал (что было зафиксировано по картосхемам пространственно-временной изменчивости РЯТ – см. выше). Изменения $I2g$ и $I3g$ на исследуемом временном интервале имеют противоположную по отношению друг к другу направленность, что связано с практически неизменными из год в год датами начала вегетационного сезона.

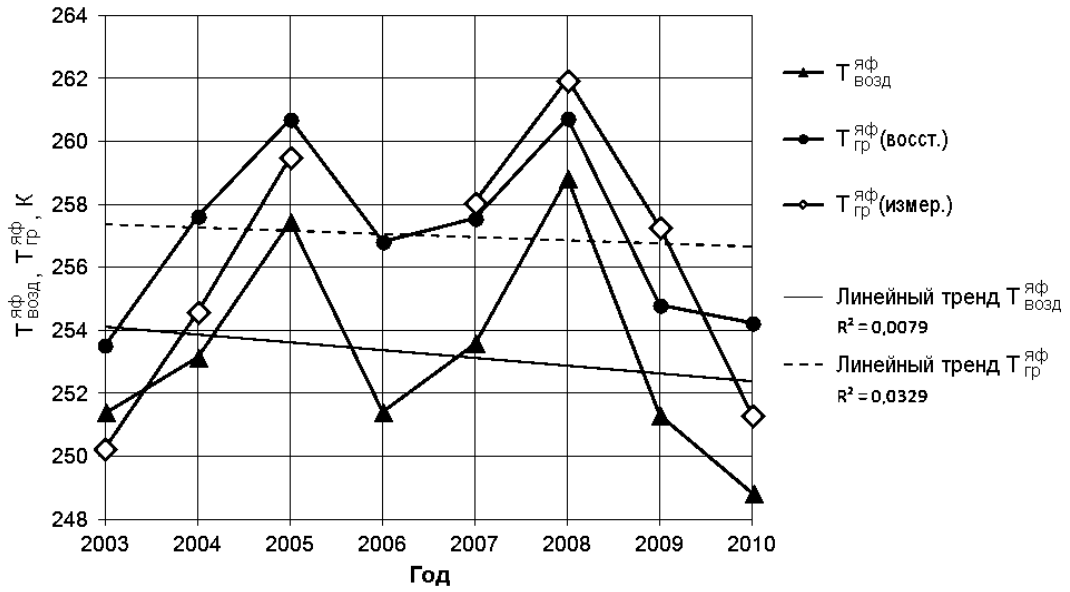


Рисунок 55 – Межгодовая динамика усредненных по территории п-ова Ямал за январь-февраль каждого года температур грунтов $T_{гр}$, восстановленных с помощью разработанного алгоритма, в сопоставлении с динамикой измеренных на ГКС Марре-Сале $T_{возд}$ и $T_{гр}$

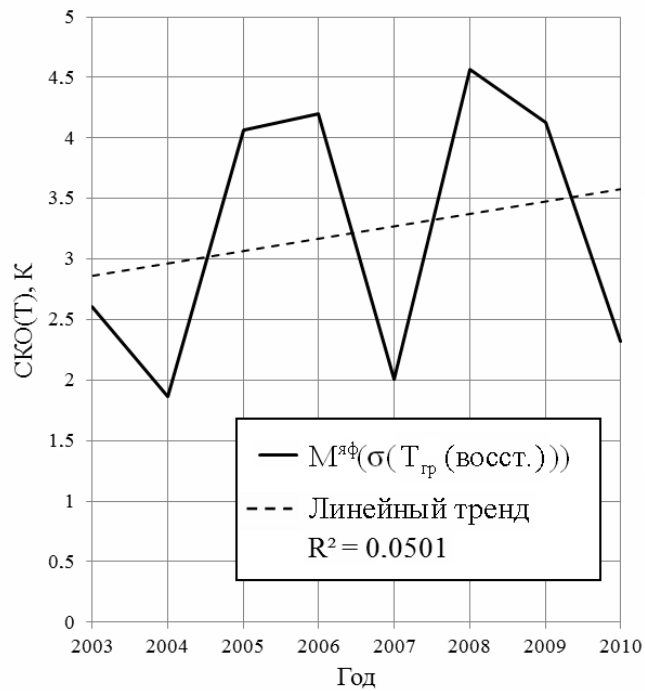


Рисунок 56 – Межгодовая динамика усредненных за январь-февраль значений СКО, выражающего вариацию восстановленных $T_{гр}$ по площади п-ова Ямал, в 2003-2010 гг.

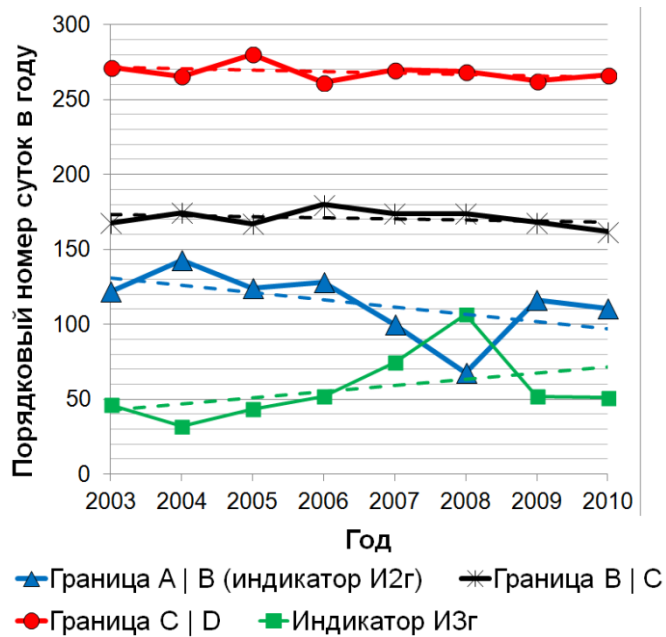


Рисунок 57 – Межгодовая изменчивость усредненного по площади п-ова Ямал положения временных границ периодов годового цикла А-D и значений индикаторов $I_{2г}$ и $I_{3г}$ в 2003-2010 гг.

Полученные результаты оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики по спутниковым СВЧ радиометрическим данным согласуются с данными опорных наземных измерений и показывают работоспособность метода применительно к евразийскому сектору Арктики.

Дальнейшее уменьшение ошибок определения значений параметров состояния мерзлых грунтов Арктики, повышение точности и достоверности оценок изменчивости их состояния может быть достигнуто комплексным использованием методов спутниковой СВЧ и ИК радиометрии. Это позволит добиться увеличения пространственного разрешения получаемой информации о состоянии грунтов и даст возможность обеспечить перекрестную проверку результатов восстановления значений их параметров. При этом, по мнению автора, в периоды стабильно мерзлого состояния грунтов основную роль в получении информации о состоянии мерзлых грунтов должно играть СВЧ радиометрическое зондирование, т.к. в этом случае сигнал от грунтов в меньшей степени искажается снежным покровом, а их излучательная способность практически неизменна. Во временные интервалы, когда грунты не покрыты снегом и слоем фотосинтетически активной растительности, целесообразным является преимущественное использование ИК радиометрии, позволяющее исключить ошибки в определении значений $T_{гр}$, связанные с резкими колебаниями коэффициентов излучения грунтов из-за изменения их влажности. В другие периоды годового цикла для достижения наилучших результатов требуется равноценное использование данных СВЧ и ИК диапазонов.

4.3 Выводы по разделу

Определены пространственные границы применимости разработанного метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов Арктики. Задача решена с помощью разработанной методики автоматизированной идентификации и дифференциации ландшафтов по спутниковым СВЧ радиометрическим данным, основанной на использовании классификатора по методу наименьшего расстояния. Методика апробирована в евразийском секторе Арктики на материале архива данных СВЧ радиометра AMSR-E. Полученное ландшафтное районирование отражает положение границ широтных зон, которые обладают схожей структурой внутригодовой изменчивости излучательных свойств в СВЧ диапазоне.

Методика позволяет идентифицировать девять основных генеральных типов ландшафтов: тундра, тундролесье (лесотундра и таежные редколесья), водно-болотные комплексы, хвойные листопадные леса, хвойные вечнозеленые леса, хвойные листопадные и смешанные леса, лиственные леса, лесостепи, степи. Она обеспечивает обнаружение участков с большой долей водных объектов, существенно изменяющих результирующие СВЧ излучательные свойства подстилающей поверхности.

Идентификация ландшафтов производится по информативным признакам – параметрам СВЧ излучения многослойных природных сред, показавшим наибольшую эффективность в тестовых испытаниях в качестве основы критериев разделения типов ландшафтов. К таким признакам отнесены следующие параметры: среднегодовые многолетние значения РЯТ на $f = 6,9$ ГГц и V-поляризации, средние январские многолетние значения РЯТ на $f = 6,9$ ГГц и V-поляризации, стандартное отклонение в рядах значений РЯТ с марта по июнь на $f = 6,9$ ГГц и H-поляризации, усредненные за периоды март-июнь многолетние значения РЯТ на $f = 6,9$ ГГц при H-поляризации.

Апробация разработанного метода оценки изменчивости состояния мерзлых грунтов выполнена на территории п-ова Ямал, который расположен в «ключевом» для мониторинга мерзлых грунтов районе Арктики, Западной Сибири, на материале архива спутниковой съемки СВЧ радиометра AMSR-E за 2003-2011 гг.

Предварительный анализ СВЧ радиометрических данных, представленных в виде картосхем пространственно-временной изменчивости РЯТ вдоль трансекта меридиана 70° в.д., позволил выявить особенности изменчивости состояния грунтов, которые могут являться источниками ошибок при использовании разработанного программно-алгоритмического обеспечения. Приведено обоснование возможности круглогодичного использования участков ЗС, покрытых хвойными вечнозелеными лесами, в качестве «чёрного тела» для дальнейшего развития метода «внешней» калибровки спутниковой СВЧ аппаратуры

Для п-ова Ямал получены интегральные оценки пространственной и временной изменчивости состояния мерзлых грунтов в 2003-2010 гг. Для этого с использованием разработанного программно-алгоритмического и методического обеспечения были определены значения индикаторов изменчивости во внутригодовом и межгодовом масштабе.

По усредненным за январь-февраль восстановленным T_{zp} для территории п-ова Ямал не было выявлено значимых тенденций повышения или понижения температуры мерзлых грунтов в 2003-2010 гг. Однако на данном временном интервале была обнаружена слабо выраженная тенденция к смещению границы между зимне-весенним периодом стабильно мерзлого состояния грунтов и весенне-летним периодом интенсивных фазовых переходов грунтовой влаги в сторону более ранних дат.

Заключение

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

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 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.

Автор выражает благодарность научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору Владимиру Владимировичу Мелентьеву, за наставничество и всестороннюю помощь в организации научной работы, сотрудникам кафедр 5, 15, 43, 54 ГУАП за ценные замечания и рекомендации, а также членам семьи за поддержку в реализации планов.

Список литературы

1. Атлас СССР. М.: ГУГК, 1983. 260 с.
2. Анисимов, О. А. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Глава 8. Континентальная многолетняя мерзлота / О. А. Анисимов, Ю. А. Анохин, С. А. Лавров и др. // Под ред. С. М. Семенова. Росгидромет. М., 2012. 508 с.
3. Бабкин, В. И. Сибирский антициклон и его влияние на сток Оби, Енисея и Лены / В. И. Бабкин, В. Н. Воробьев, Н. П. Смирнов // Метеорология и гидрология. 2005. №4. С. 102-108.
4. Башаринов, А. Е. Радиоизлучение Земли как планеты / А. Е. Башаринов, А. С. Гурвич, С. Т. Егоров. М: Наука, 1974.
5. Белич, В. В. Использование спутниковых микроволновых данных для восстановления параметров земной поверхности / В. В. Белич, Л. А. Пенязь, А. Г. Горелик и др. // Космическая геофизика: Материалы Всесоюз. семинара по методам интерпретации спутниковой информации о гидрометеорологических параметрах природной среды / Под ред. А.И. Бурцева, А.П. Тищенко. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. С. 10–15.
6. Берг, Л.С. Физико-географические (ландшафтные) зоны СССР. Ч. I. Л.: Изд-во ЛГУ, 1938. 429 с.
7. Бобров, П. П. Диэлектрическая спектроскопическая модель влажной почвы, использующая физические и гидрологические характеристики почв / П. П. Бобров, В. Л. Миронов, О. А. Ивченко и др. // Пр.–837Ф. Красноярск: Препринт института физики им. Л. В. Киренского СО РАН. 2006. 16 с.
8. Бобылев, Л. П. Расчет характеристик радиотеплового излучения для различных моделей облачной атмосферы / Л. П. Бобылев, М. А. Васищева, С. П. Образцов и др. // Труды ГГО. 1975. Вып. 328. С. 22 – 49.
9. Богородский, В. В. Микроволновая радиометрия земных покровов / В. В. Богородский, А. И. Козлов. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 272 с.
10. Боярский, Д. А. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мёрзлых почв / Д. А. Боярский, В. В. Тихонов // М.: Препринт ИКИ РАН. Пр-2084. 2003. 48 с.
11. Влияние гидрофизических характеристик почв на изменение радиояркостной температуры при промерзании или оттаивании поверхностного слоя / П. П. Бобров, П. В. Жиров, С. В. Кривальцевич, А. С. Яценко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Выпуск 3. Том II. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. С. 287–293.

12. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. Якутское геологическое управление. Институт мерзлотоведения СО АН СССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
13. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация.
14. Дистанционные методы исследования морских льдов / Р.Х.Вагапов, В.П.Гаврило, А.И.Козлов, Г.А.Лебедев и др. СПб: Гидрометеиздат, 1993. 342 с.
15. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2013 год. НИУ Росгидромета. Москва, 2014. 109 с.
16. Ершов, Е. Д. Геокриология СССР. Западная Сибирь. М.: Недра, 1989. 456 с.
17. Зыков, Ю. Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1999. 243 с.
18. Израэль Ю.А. Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России / Ю. А. Израэль, А. В. Павлов, Ю. А. Анохин // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 18–27.
19. Калинин, А. А. Исследование взаимосвязи отражательных свойств сосновых лесов и водного режима элементов деревьев / А. А. Калинин, М. С. Крылова, Н. А. Арманд и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 11. С. 1239.
20. Карта наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation / С. А. Барталев, А. С. Белвард, Д. В. Ершов, А. С. Исаев // Проект Global Land Cover 2000. Информационная система TerraNorte. Институт космических исследований РАН, 2004. (<http://terranorte.iki.rssi.ru>).
21. Комаров, С. А. Микроволновое зондирование почв / С. А. Комаров, В. Л. Миронов // Новосибирск: Наука. НИЦ СО РАН, 2000. 289 с.
22. Кондратьев, К. Я. Возможности дистанционного зондирования грунтов (численный эксперимент) / К. Я. Кондратьев, Е. М. Шульгина // Труды ГГО. 1974. Вып. 331. С. 50 – 63.
23. Кондратьев, К. Я. Дистанционная индикация акваторий и водосборов / К. Я. Кондратьев, В. В. Мелентьев, В. А. Назаркин. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 248 с.
24. Марцинкевич, Л. М. Модельные расчеты теплового радиационного излучения поверхности моря при установившемся и полностью развитом волнении / Л. М. Марцинкевич, В. В. Мелентьев // Труды ГГО. 1975. №. 331. С. 73-85.
25. Матвеева, Н. В. Зональность в растительном покрове Арктики / РАН. Труды ботанического института им. В. Л. Комарова. СПб, 1998. 220 с.
- 26. 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.
27. 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.
28. Мателенок И. В. Векторно-координатный подход к определению геометрии визирования при учете влияния крупномасштабных неровностей поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства / И. В. Мателенок, В. В. Мелентьев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Том 11. №4. С. 300-309. В печати.
29. Мелентьев, В. В. Возможности спутниковой СВЧ-радиометрии для широтно-зональной дифференциации ландшафтов Западной Сибири / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // Лесоведение. 2014. №5. С. 54-64.
30. Мелентьев, В. В. Излучательная способность естественных поверхностей в микроволновом диапазоне / В. В. Мелентьев, Ю. И. Рабинович // Труды ГГО. 1976. Вып. 371. С. 12–21.
31. Мелентьев, В. В. Изменчивость состояния мерзлых почвогрунтов и других типов подстилающей поверхности Западной Сибири в пространственно-временных координатах: данные спутниковой СВЧ диагностики / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // 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.
32. Мелентьев, В. В. Исследование временной изменчивости радиояростной температуры подстилающей поверхности тундровых территорий с использованием усовершенствованной модели многослойной СВЧ излучающей среды / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // 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.
33. Мелентьев, В. В. Межгодовая изменчивость состояния мерзлых почвогрунтов полуострова Ямал и ее количественная оценка на материале архива данных

- AMSR-E 2003-2010 гг. / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // Исследование Земли из космоса. 2015. №3 (принято к публикации).
34. Мелентьев, В. В. Методология спутниковой СВЧ-диагностики широтно-зональной и сезонной изменчивости мерзлых почвогрунтов и морского льда / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // Лед и снег. 2013. №1 (121). С. 73-82.
35. Мелентьев, В. В. Многолетне- и сезонно-мерзлые почвогрунты Западной Сибири: методология и практика аэрокосмической дистанционной СВЧ диагностики в пространственно-временных координатах / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром. 2012 г. С. 283-288.
36. Мелентьев, В. В. Модельные расчеты СВЧ-излучательных свойств пресноводного льда и мерзлых грунтов / В.В. Мелентьев, В.Ю.Александров // Труды ААНИИ. 1991. Т. 421. С. 138-146.
37. Мелентьев, В. В. Некоторые результаты лабораторных измерений коэффициентов излучения естественных поверхностей / В. В. Мелентьев, Ю. И. Рабинович // Труды ГГО. 1972. Вып. 291. С. 14 – 17.
38. Мелентьев, В. В. Опыт спутниковой СВЧ диагностики почвогрунтов / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // Вопросы радиометеорологии: сб. статей памяти В.Д. Степаненко. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, ООО «Изд-во «Балтийская печать». 2013. С. 283-304.
39. Мелентьев, В. В. Опыт спутниковой СВЧ широтно-зональной дифференциации ландшафтов таежной, лесотундровой и тундровой природных зон Западной Сибири / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // 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.
40. Мелентьев, В. В. Распознавание границ периодов внутригодовой изменчивости состояния почвогрунтов тундровой зоны по данным спутниковой СВЧ съемки / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // 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.
41. Мелентьев, В. В. Теория и практика спутникового СВЧ-мониторинга излучательных свойств многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых почвогрунтов Северной полярной области / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // Сборник

- докладов Научной сессии ГУАП, посвященной Всемирному дню космонавтики. Ч. 2. СПб. ГУАП. 9 – 11 апреля 2012 г. С. 123-126.
42. Мелентьев, В. В. Технология спутникового СВЧ мониторинга почвогрунтов Арктики / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // 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.
43. Мильшин, А. А. Исследование сезонной динамики характеристик излучения системы поверхность-лес-атмосфера в СВЧ-диапазоне / А.А. Мильшин, А.Г. Гранков, Н.К. Шелобанова // Препринт №3 (624), ИРЭ РАН, М. 1998. 62 с.
44. Митник, Л. М. Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М № 1 и AMSR-E со спутника Aqua / Л. М. Митник, М. Л. Митник, И. А. Гурвич и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. №4. С. 121-128.
45. Митник, Л. М. Спутник Японии GCOM-W1: моделирование, калибровка и первые результаты восстановления параметров океана и атмосферы / Л. М. Митник, М. Л. Митник, Е. В. Заболотских // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. №3. С. 135–141.
46. Михайлов, В. Ф. Микроволновая спутниковая аппаратура дистанционного зондирования Земли: Учебное пособие / В. Ф. Михайлов, И. В. Брагин, С. И. Брагин. СПб.: ГУАП, 2003. 404 с.
47. Музалевский, К. В. Измерение температуры деятельного слоя почвы арктической тундры на основе радиометрических наблюдений в L-диапазоне / К. В. Музалевский, В. Л. Миронов, А. А. Швалева // Вестник СибГАУ. 2013. Т. 5. С. 51.
48. Определение некоторых физических характеристик поверхностного слоя почвы по радиотепловому излучению / К. Я. Кондратьев, В. В. Мелентьев, Ю. И. Рабинович, Е. М. Шульгина // ДАН СССР. 1973. Т. 208. № 2. С. 342–345.
49. Основные направления экспериментальных исследований лесов спутниковыми СВЧ радиометрическими методами / А. Г. Гранков, А. А. Мильшин, А. А. Чухланцев, Н. К. Шелобанова // Сборник статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Выпуск 2 – Том 2. 2005.
50. Павлов, А. В. Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата / А. В. Павлов, Г. З. Перльштейн, Г. С. Типенко // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. №. 1. С. 3-12.

51. Павлов, А. В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. №. 3. С. 22-27.
52. Пармузин, Ю. П. Тундролесье СССР. М.: Мысль, 1979. 295 с.
53. Петропавловская, М. С. Дистанционные методы изучения криолитозоны (на примере Якутии). Л.: Гидрометеиздат, 1988. 69 с.
54. Прогноз теплового состояния грунтов при освоении северных районов / В.П. Чернядьев, А.Л. Чеховский, А.Я. Стремяков, В.А. Пакулин. М.: Наука, 1984. 136 с.
55. Рабинович, Ю. И. Анализ результатов измерений характеристик ледяного покрова (вариант С) / Ю. И. Рабинович, В. С. Лоцилов, Е. М. Шульгина // Советско-американский эксперимент «Беринг». Труды заключительного симпозиума по итогам советско-американской экспедиции / Л.: Гидрометеиздат, 1975. С. 284–313.
56. Романов, А. Н. Экспериментальные исследования диэлектрических свойств почвообразующих минералов и минеральных солей в микроволновом диапазоне. Барнаул: АГУ, 2002. 50 с.
57. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / Под ред. А. И. Бедрицкого. СПб.; М.: Летний сад, 2008. Т. 1: А-И. 336 с.
58. Сумгин, М. И. Вечная мерзлота. Л.: Изд-во АН СССР, 1931. 85 с.
59. Трофимов, В. Т. Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский и др. // Под ред. В. Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
60. Фролов, А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино: Изд-во ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. 607 с.
61. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов. Учебн. пособие. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
62. Цытович, Н. А. О физических явлениях и процессах в промерзающих, мерзлых и протаивающих грунтах. / Н. А. Цытович, З. А. Нерсесова // Сб. 3 «Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов». Под ред. Н.А.Цытовича. Изд-во АН СССР, 1957.
63. Численные методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, А. В. Гончарский, В. В. Степанов, А. Г. Ягола // М.: Наука, 1990. 228 с.
64. Чухланцев, А. А. СВЧ-излучение земной поверхности при наличии растительного покрова / А. А. Чухланцев, К. П. Кирдяшев, А. М. Шутко // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 2. С. 256-264.
65. Швецов, П. Ф. Вводные главы к основам геокриологии / Материалы к основам учения о мерзлых зонах земной коры. Вып. 1. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1955. 110 с.

66. Шеин, Е. В. Агрофизика / Е. В. Шеин, В. М. Гончаров // Ростов на Дону: Феникс, 2006. 400 с.
67. Шутко, А. М. СВЧ - радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 189 с.
68. Ямало-Гыданская область (физико-географическая характеристика) / Под ред. Р. К. Сиско. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 309 с.
69. A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-Arctic areas / M. Fily, A. Royer, K. Goita, and C. Prigent // Remote Sens. Environ. 2003. Vol. 83. No. 3. P. 328–338.
70. Anisimov, O. A. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models / O. A. Anisimov, N. I. Shiklomanov, F. E. Nelson // Global and Planetary Change. 1997. № 3–4. P. 61–77.
71. Arctic Regional Ocean Observing System (Arctic ROOS). Comparison of sea ice algorithms, URL: <http://arctic-roos.org/observations/comparison-of-algorithms>.
72. Bartsch, A. Implementation of a satellite data based permafrost information system - the DUE PERMAFROST project / A. Bartsch, A. Wiesmann, T. Strozzi et al. // In Proc. 'ESA Living Planet Symposium' Bergen 2010 (Ed. H. Lacoste), ESA SP-686 (CD-ROM), ESA. 2010.
73. Chang, A. T. C. Monitoring Soil Condition in the Northern Tibetan Plateau Using SSM/I Data / A. T. C. Chang, M. S. Cao // Nordic Hydrology. 1996. Vol. 27. No. 3. P. 175–184.
74. Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions / J. Brown, O.J., Jr. Ferrians et al. // Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. Digital media. 1998, revised February 2001.
75. Circumpolar Active Layer Monitoring, URL: <http://www.udel.edu/Geography/calm/>
76. De Rosnay, P. The Community Microwave Emission Model / P. de Rosnay, M. Drusch // ECMWF, April. 2008.
77. Developing a global data record of daily landscape freeze/thaw status using satellite microwave remote sensing / Y. Kim, J. S. Kimball, K. C. McDonald, J. Glassy // Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. Vol. 49. No. 3. P. 949-960.
78. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils / B.J. Choudhury, T.J. Schmugge, A. Chang, R.W. Newton // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84, pp. 5699-5706.
79. England, A. W. Thermal microwave emission from a scattering layer // Journal of Geophysical Research. 1975. Vol. 80. No. 32. P. 4484-4496.
80. European Space Agency: SMOS, URL: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos>.

81. Evaluation of terrain effect on microwave radiometer measurement and its correction / G. Ying, S. Jiancheng, D. Jinyang, F. Xiuli // *International Journal of Remote Sensing*. 2011, Vol. 32:24, pp. 8899-8913.
82. Ferrazoli, P. Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation / P. Ferrazoli, L. Guerriero // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 1996. Vol. 34, pp. 433-443.
83. Forster, R.R. The onset of Arctic sea-ice snowmelt as detected with passive-and active-microwave remote sensing / R.R. Forster et al. // *Annals of Glaciology*. – 2001. – T. 33. – №. 1. – C. 85-93.
84. Grandell, J. Subpixel land use classification and retrieval of forest stem volume in the boreal forest zone by employing SSM/I data / J. Grandell, J. Pulliainen, M. T. Hallikainen // *Remote Sensing of Environment*. 1998. V. 63. № 2. P. 140–154.
85. Grody, N.C. Surface identification using satellite microwave radiometers // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1988. V. 26. № 6. P. 850–859.
86. Hachem, S. Using the MODIS land surface temperature product for mapping permafrost: An application to Northern Que´bec and Labrador, Canada / S. Hachem, M. Allard, C. Duguay // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2009. No. 20. P. 407 – 416.
87. Hallikainen, M., Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range / M. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. Abdelrazik // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986. AP34. P. 1329–1340.
88. Hallikainen, M. T. Satellite microwave radiometry of forest and surface types in Finland / M. T. Hallikainen, P. A. Jolma and J. M. Hyyppa // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1988. V. 26. № 5. P. 622–628.
89. Hallikainen, M. The physical basis for sea ice remote sensing / M. Hallikainen, D. P. Winebrenner // *Microwave remote sensing of sea ice*, edited by F. D. Carsey. Washington, DC: American Geophysical Union. 1992.
90. Heim B. et al. ESA DUE Permafrost: An Earth observation (EO) permafrost monitoring system // *EARSel eProceedings*. 2011. Vol. 10. No. 2. P. 73-82.
91. Jackson, T. J. Vegetation effects on the microwave emission of soils / T. J. Jackson, T. J. Schmugge // *Remote Sensing of Environment*. 1991. Vol. 36. No. 3. P. 203-212.
92. Japan Aerospace Exploration Agency. Earth Observation Research Center (EORC). AMSR-E Level 1 format description, URL: http://www.eorc.jaxa.jp/en/hatoyama/amr-e/amr-e_format_11_e.pdf.
93. Japan Aerospace Exploration Agency. Earth Observation Research Center (EORC). Data Distribution Service, URL: <http://www.eorc.jaxa.jp/en/about/distribution/contact/index.html>.

94. Jones, L. A. Satellite microwave remote sensing of boreal and arctic soil temperatures from AMSR-E / L. A. Jones, J. S. Kimball, K. C. McDonald et al. // *Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007. V. 45. No. 7. P. 2004–2018.
95. Komarov, S.A. Remote sensing methods of frozen soils in VHF Range. / S.A. Komarov, V.L. Mironov, A.N. Romanov // *Proceedings of Int. Geoscience and Rem. Sens. Symposium (IGARSS'93)*. Tokyo. 1993. p. 1988–1990.
96. Kondratyev, K.Ya. High latitude climate and remote sensing / K.Ya. Kondratyev, O.M. Johannessen, V.V. Melentyev // *John Wiley-Praxis Series in Remote Sensing*. Chichester, UK. PRAXIS Publishing Ltd, 1996. 200 p.
97. Knowles, K. EASE-Grid Land Cover Data Resampled from Boston University Version of Global 1 km Land Cover from MODIS 2001, Version 4. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital Media. 2004.
98. Langer, M. Satellite-based modeling of permafrost temperatures in a tundra lowland landscape / M. Langer, S. Westermann, M. Heikenfeld et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2013. 135, P. 12-24.
99. Matzler, C. Relief effects for passive microwave remote sensing / C. Matzler, A. Standley // *Int. J. Remote Sens.* 2000. Vol. 21, pp. 2403–2412.
100. Mapping freeze/thaw boundaries with SMMR data / B. W. Zuerndorfer, A. W. England, M. C. Dobson, F. T. Ulaby // *Agric. For. Meteorol.* 1990. Vol. 52. P. 199–225.
101. McDonald, K. C. Chapter 53: Freeze–thaw states using both active and passive microwave sensors / K. C. McDonald and J. S. Kimball; edited by M. G. Anderson, N. J. Hoboken // *In Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Wiley, 2005.
102. Melentyev, V. V. Dynamics of the Jamal/Western Siberian permafrost zone: results of satellite investigations // *Proc. of the Int. Symposium "Conservation and transformation of matter and energy by the Earth cryosphere"*, 1-5 June 2001, Pushino, Russia.
103. Melentyev, V. V. Jamal - Siberian permafrost zone in changing climate: experience of application use of passive microwave and ERS SAR satellite data / V. V. Melentyev O. M. Johannessen, L. P. Bobylev // *Proc. of 6-th Int. Conference of LOIRA*. November 2002, Moscow, Russia.
104. Melentyev, V. V. Model calculations of microwave emissivity of freshwater ice and frozen soils / V. V. Melentyev, V. Yu. Alexandrov // *Proc. Of AARI*. 1991. V 421. P. 138–146.
105. **Melentyev, V. V. Frozen grounds: improved theoretical model of emissivity in microwave and changing of the parameters by using AMSR-E / V. V. Melentyev, I. V. Matelenok // *Proceedings of the Lahti Symposium «Seasonal Snow and Ice»*. Lahti. 28 May – 01 June 2012. Digital media (Flash-drive and web-site).**

106. Melentyev, V. V. **Permafrost and seasonally frozen grounds in changing climate: revealing of the parameters modification with using passive microwave survey / V. V. Melentyev, I. V. Matelenok // Proceedings of the 3rd International SPACE World Conference. Frankfurt/Main. November 6 – 8 2012.**
107. Melentyev, V.V. **Technique for latitudinal discrimination of Siberian landscapes based on satellite passive microwave data / V. V. Melentyev, I. V. Matelenok // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7. No. 7. P. 827-837. In press.**
108. Melentyev, V. V. Siberian permafrost and seasonally frozen grounds: parameters retrieval using microwave satellite data / V. V. Melentyev, O. M. Johannessen, L. P. Bobylev // Исследование Земли из космоса. 2005. № 5. С. 1–7.
109. Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models / M. Dobson, F. Ulaby, M. Hallikainen, M. El-Rayes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1985. Vol. 23, pp. 35–46.
110. Mironov, V. L. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils / V. L. Mironov, M. C. Dobson, V. H. Kaupp et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004. V. 42, № 4, P.773-785.
111. Mironov, V. L. Radiobrightness dynamics of freezing/thawing processes for different soils / V. L. Mironov, P. P. Bobrov, P. V. Zhirov et al. // Proc. IGARSS'06. 2006. Vol. 6. P. 3015-3018.
112. Mladenova, I. E. Remote monitoring of soil moisture using passive microwave-based techniques – Theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E / I. E. Mladenova, T. J. Jackson, E. Njoku et al. // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 144. P. 197-213.
113. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table.
114. National Climatic Data Center (NCDC). Database «Global Summary of The Day», <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd>.
115. National Snow and Ice Data Center, <http://www.nsids.org>.
116. Neale, C. M. U. Land surface type classification using microwave brightness temperatures from the SSM/I / C. M. U. Neale, M. J. McFarland, K. Chang // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1990. V. 28. № 5, P. 829–837.
117. Njoku, E. G. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6-18 GHz / E. G. Njoku, L. Li // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1999. Vol. 37. No. 1. P. 79-93.

118. Permafrost and active layer modeling in the Northern Eurasia using MODIS land surface temperature as an input data / S. Marchenko, S. Hachem, V. Romanovsky, C. Duguay // Proceedings of European Geosciences Union General Assembly, Topfer, Vienna, 2009. Vol. 11. EGU2009-11077.
119. Pulvirenti, L. Topographic effects on the surface emissivity of a mountainous area observed by a spaceborne microwave radiometer / L. Pulvirenti, N. Pierdicca, F. S. Marzano // *Sensors*. 2008. Vol. 8(3). pp. 1459-1474.
120. Rees, W. G. Remote sensing of snow and ice. L.: Taylor & Francis, 2006. 312 pp.
121. Rogers, N. C. A generic model of 1-60 GHz radio propagation through vegetation-final report / N. C. Rogers, A. Seville, J. Richter et al. // Radio Agency, UK. 2002. 152 p.
122. Schanda, E. Passive microwave sensing // In: *Remote Sensing for Environmental Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 1976. P. 187-256.
123. Shifrin, K. S. (ed.). Transfer of microwave radiation in the atmosphere. – Israel Program for Scientific Translations; [available from the US Dept. of Commerce, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, Springfield, Va.], 1970. No. 590.
124. Shiklomanov, N. I. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: data collection, management, and dissemination strategies / N. I. Shiklomanov, F. E. Nelson, D. A. Streletskiy et al. // 9th International Conference on Permafrost, ed. D. L. Kane and K. M. Hinkel. 2008. Vol. 2. P. 1647-1652.
125. Smith, N. V. Trends in high northern latitude soil freeze and thaw cycles from 1988 to 2002 / N. V. Smith, S. S. Saatchi, J. T. Randerson // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. D12101.
126. Spreen, G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels / G. Spreen, L. Kaleschke, G. Heygster // *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012). 2008. T. 113. №. C2.
127. Stiles, W. H. The active and passive microwave response to snow parameters. 1. Wetness / W. H. Stiles, F. T. Ulaby // *Journal of Geophysical Research*. 1980. 85 (C2). P. 1037–1044.
128. Stolbovoi, V. Maps of soil characteristics / V. Stolbovoi, I. Savin // In Stolbovoi V. and I. McCallum, eds. *Land resources of Russia*. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science. CD-ROM. Distributed by the National Snow and Ice Data Center, Boulder. 2002.
129. Sturm, M. Passive microwave measurements of tundra and taiga snow covers in Alaska, USA / M. Sturm, T. C. Grenfell, D. K. Perovich // *Annals of Glaciology*. 1993. 17. P. 125–130.

130. The R Project for Statistical Computing, <http://www.r-project.org>.
131. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar / B. Rabus, M. Eineder, A. Roth, R. Bamler // *Photogramm. Rem. Sens.* 2003. Vol. 57. P. 241-262.
132. Thermal microwave radiation: applications for remote sensing / C. Matzler, P.W. Rosenkranz, A. Battaglia, J.-P. Wigneron // *IET electromagnetic waves series*. The Institution of Engineering and Technology. L., 2006. Vol. 52. P. 555.
133. Townshend, J. R. G. A comparison of SMMR and AVHRR data for continental land cover characterization / J. R. G. Townshend, C. O. Justice, B. J. Choudhury et al. // *Int. J. Rem. Sens.* 1989. V. 10. № 10. P. 1633–1642.
134. Using the special sensor microwave/imager to monitor land surface temperatures, wetness, and snow cover / A. Basist, N.C. Grody, T.C. Peterson, C.N. Williams // *J. Appl. Meteorol.* 1998. Vol. 37, No. 9. P. 888–911.
135. Wigneron, J.P. Microwave emission of vegetation: Sensitivity to leaf characteristics / J.P. Wigneron, J.C. Calvet, Y. Kerr et al. // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1993. Vol. 31, pp. 716-726.
136. Zhang, T. Soil freeze/thaw cycles over snowfree land detected by passive microwave remote sensing / T. Zhang, R. L. Armstrong // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. No. 5. P. 763– 766.