

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СО РАН

ДЕПАРТАМЕНТ ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ
ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА
ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЁННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ЯНАО
«НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ИЗУЧЕНИЯ АРКТИКИ»

**КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
АРКТИЧЕСКИХ И СУБАРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ
ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА**

Барнаул – Салехард – 2018

УДК 528.46+621.371

ББК 26.8в675

К 71

Коллектив авторов

Романов А.Н., Хвостов И.В., Уланов П.Н., Ковалевская Н.М., Кириллов В.В.,
Плуталова Т.Г., Кобелев В.О., Печкин А.С., Сеницкий А.И., Сысоева Т.Г., Хворова Л.А.

Космический мониторинг арктических и субарктических территорий Ямало-Ненецкого автономного округа / А.Н. Романов и др. – Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс», 2018. – 120 с.

Монография посвящена разработке методов космического мониторинга арктических территорий. Описан опыт использования снимков Landsat для оценки степени деградации тундровой растительности. Приведены результаты исследований диэлектрических и радиоизлучательных характеристик некоторых видов тундровой растительности в микроволновом диапазоне от объемной влажности и температуры. По данным лабораторных измерений установлены зависимости показателей преломления и поглощения, действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, коэффициентов излучения растительности, почвы, применяемые для валидации данных космического микроволнового зондирования.

Монография предназначена для специалистов, разрабатывающих дистанционные методы зондирования, аспирантов, студентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ–ЯНАО № 16-45-890664 «Разработка микроволновых методов дистанционной диагностики состояния растительного покрова тундры на основе исследования диэлектрических характеристик тундровой растительности» (Договор о предоставлении гранта на реализацию научного проекта РФФИ–ЯНАО на территории Ямало-Ненецкого автономного округа от 22 июня 2016 №01-17/31).

Спутниковые данные SMOS получены в рамках проекта Европейского космического агентства (ESA) № 4747 «Remote mapping of Siberian saline soils».

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор В.Е. Павлов,
кандидат физико-математических наук, доцент В.В. Пашнев

ISBN 978-5-6040289-8-8

© Романов А.Н., Хвостов И.В., Уланов П.Н.,
Ковалевская Н.М., Кириллов В.В., Плуталова Т.Г.,
Кобелев В.О., Печкин А.С., Сеницкий А.И., Сысоева Т.Г., Хворова Л.А.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И РАДИОИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУНДРОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ (Романов А.Н., Уланов П.Н.)	11
КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТУНДРЫ (Романов А.Н., Хвостов И.В., Кириллов В.В., Синицкий А.И., Печкин А.С., Кобелев В.О.)	47
СВЯЗЬ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ РАДИОЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР АКВАТОРИИ КАРСКОГО МОРЯ С ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ В АРКТИКЕ (Романов А.Н., Хвостов И.В., Синицкий А.И., Печкин А.С.)	68
ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ЕЕ ПОЛНОЙ ДЕГРАДАЦИИ НА ПОЛУОСТРОВАХ ЯМАЛ И ГЫДАН ПО ДАНЫМ LANDSAT-8 (Ковалевская Н.М., Плуталова Т.Г., Хворова Л.А., Сысоева Т.Г., Романов А.Н.)	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	109

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

f – частота, [ГГц];

W – объемная влажность, [$\text{см}^3/\text{см}^3$];

W_M – массовая влажность, [г/г];

M_B – масса воды в образце, [г];

M_P и M_S – массы влажного и сухого образца, [г];

ρ_P и ρ_S – плотности влажного и сухого образца, [$\text{г}/\text{см}^3$];

$Z_B = M_B/M$ – массовая доля воды в почве, [г/г];

t – температура в Цельсиях, [$^{\circ}\text{C}$];

T – температура в Кельвинах, [K];

A – ослабление электромагнитной волны в коаксиальном волноводе, [дБ];

φ – сдвиг фазы электромагнитной волны в коаксиальном волноводе, [град.];

$N = n + i \cdot k$ – комплексный показатель преломления (КПП);

n и k – показатели преломления и поглощения;

$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ – комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП);

ε' и ε'' – действительная и мнимая части КДП;

$dn, dk, d\varepsilon', d\varepsilon''$ – погрешности соответствующих величин;

χ – коэффициент излучения при зондировании в надир;

χ_H, χ_V – коэффициенты излучения на горизонтальной и вертикальной поляризации;

$\text{tg } \delta$ – тангенс угла потерь.

ВВЕДЕНИЕ

Российская Арктика занимает площадь около 9 млн. км². В связи с возрастающей необходимостью интенсивного освоения малонаселенных территорий становится актуальной разработка оперативных методов космического мониторинга. Возникает проблема интерпретации данных дистанционного зондирования арктических территорий, характеризующихся разным типом подстилающей поверхности (вечная мерзлота, засоленные почвы, находящиеся при отрицательных температурах, талики, прибрежная зона, многолетние льды с разной степенью солености и открытая соленая вода, пресные водоемы, периодически замерзающие, с наличием льда разной толщины). Для этих целей целесообразно использовать данные спутникового зондирования в оптическом, инфракрасном, микроволновом диапазонах, результаты наземных исследований, лабораторных измерений диэлектрических характеристик почв и воды, отобранных с тестовых участков.

Исключительно важную роль в сохранении энергетического баланса Арктических территорий играет растительный покров тундры, предохраняющий вечную мерзлоту от таяния и деградации. Так как многие горизонты вечной мерзлоты содержат метан, то при деградации растительности, способствующей деградации вечной мерзлоты, возможно многократное возрастание содержания метана в атмосфере, что может привести к серьезным климатическим изменениям на всей планете. В связи с огромной территорией, занимаемой тундрой и труднодоступностью, действенный контроль негативных изменений, происходящих с растительным покровом

тундры возможен только с использованием методов дистанционного зондирования. Значительная часть работ, опубликованных за последние сорок лет, посвящена исследованию спектральных характеристик растительности в оптическом и инфракрасном диапазонах. Однако в указанных спектральных диапазонах сильное экранирующее влияние оказывают снежный покров и облачность.

Разработаны и широко используются методы спектрального и гиперспектрального зондирования растительности в оптическом и инфракрасном диапазонах [Барталев, 2011]. Недостатком этих методов является сильное экранирующее влияние снежного покрова и облачности. В последние годы для оценки растительности используются спутниковые изображения, полученные в оптическом и микроволновом диапазонах [Grant, 2016]. Комбинирование микроволновых и оптических данных, полученных в разные периоды времени, позволяет определить влажностные характеристики почвы и растительности. Микроволновые измерения используются для оценки скин-слоя растительности, являющегося индикатором содержания воды в наземной части растительности и влажности почвы. Разработан алгоритм определения скин-слоя растительности и влажности почвы, основанный на использовании временных рядов радиометрических наблюдений на двух поляризациях в L-диапазоне, вместе с измерением альбедо рассеяния. Толщина скин-слоя зависит от биомассы растительности, атмосферных осадков и сезонной динамики развития растительного покрова [Konings, 2016].

Для количественной оценки свойств растительности и влажности почвы является перспективным использование

данных поляриметрических измерений радиолокаторов с синтезированной апертурой (SAR) в С-диапазоне. Помимо влажности почвы и шероховатости подстилающей поверхности данные SAR зависят от соотношения площадей, занятых разными типами растительности. Для учета влияния шероховатости поверхности и свойств растительного покрова (на примере торфяника), разработаны эмпирические модели, устанавливающие взаимосвязь между характеристиками растительности, почвенного покрова и поляриметрическими параметрами SAR. При дистанционной оценке влажности торфяников, площади, не занятые растительностью, используются в качестве репрезентативных участков [Millard, 2018].

Для дистанционного мониторинга тундры используются данные спутника SMOS на частоте 1.4 ГГц (L-диапазон), зависящие от влажности почвы, оптической глубины растительности, а также от шероховатости грунта. Влияние шероховатости и растительного покрова на зависимость яркостной температурой от влажности почвы учитывается путем измерений на разных поляризациях и углах зондирования. Комбинирование радиоярких характеристик подстилающей поверхности, измеренных со спутника SMOS, и индекса площади листа, рассчитанного на основе данных MODIS, позволяет разделить эффекты шероховатости и растительности [Parrens, 2016; Wigneron, 2017]. Спутниковые данные используются при оценке деградации вечной мерзлоты в условиях изменяющегося климата [Trofaier, 2017].

Суточная динамика радиоярких температур, измеренных с помощью AMSR-E, характеризующаяся значительной пространственно-временной изменчивостью во времени

и пространстве по всему миру, используется для получения информации о ключевых параметрах подстилающей поверхности, таких как текстура и влажность почвы, биомасса растительности. Анализ суточных циклов показал, что суточная амплитуда радиояркостной температуры уменьшается по мере увеличения плотности растительности. Межгодовые вариации суточных амплитуд радиояркостной температуры также согласуются с сезонностью растительного покрова [Norouzi, 2015].

Комплексный анализ спутниковых данных SMOS (L-диапазон) и AMSR-E (C-диапазон) позволил установить пространственно-временную изменчивость влажности подстилающей поверхности с разным типом растительности. Данные SMOS и AMSR-E дополняют друг друга при мониторинге влажности подстилающей поверхности с растительностью [Al-Yaari, 2014]. Пространственное разрешение пассивных радиометрических наблюдений из космоса составляет десятки километров. Радиояркостная температура подстилающей поверхности зависит от ее физических характеристик, наличия растительного покрова, Для выделения вкладов растительности и водоемов в суммарное излучение подстилающей поверхности радиояркостные температуры измеряются в зимний период, с использованием априорных данных о снежном и растительном покровах, а также об озерном льде [Lemmetyinen, 2011].

Методы микроволнового зондирования используются для оценки состояния древесной растительности [Гранков, 2005], оценки биомассы надводной растительности. Диэлектрические свойства растительности исследуются для учета экрани-

рующего влияния растительного покрова при микроволновом дистанционном определении влажности почвы, а также для улучшения радиосвязи [Krapivin, 2006; Paloscia, 1992; Konings, 2016]. Для северных стран Европы, а также арктических территорий, значительную часть которых занимает тундра, наблюдается деградация растительного покрова планеты, связанная с изменением видового состава растительных сообществ, исчезновением отдельных видов растительности, антропогенным воздействием. [Kashulina, 1997; Evans, 1997]. Необходимость регулирования антропогенной нагрузки на растительные сообщества тундры ставит первоочередной задачей разработку оперативных методов дистанционной диагностики растительности на больших площадях.

Причинами деградации растительности тундры являются интенсификация добычи нефти и газа в районах Арктики, загрязнение территорий [Buchkina, 1998; Forbes, 1999; Oostdam, 2005; Kozak, 2013]; перевыпас одомашненного северного оленя [Rickbeil, 2015]; отепляющее влияние городов, влияние климатических изменений, включая таяние льдов и вечной мерзлоты [Tutubalina, 2001; Reynolds, 2008]. Растительный покров тундры как один из компонентов экосистемы тесно связан с рельефом и почвой. На изменение биоразнообразия тундровой растительности также влияет температура многолетнемерзлых пород. Увеличение мощности мохового и лишайникового покрова приводит к уменьшению глубины сезонного протаивания, понижению температуры почв [Москаленко, 2009].

Совместная комплексная обработка радиолокационных и многоспектральных оптических изображений позволяет по-

высить достоверность дистанционной классификации земных покровов и количественной оценки биофизических параметров древесной растительности [Бондур, 2008]. Разработка контактных и дистанционных методов оценки состояния растительности тундры основана на изучении особенностей распространения и взаимодействия электромагнитных волн с растительностью, установлении зависимостей диэлектрических и радиоизлучательных характеристик растительности от типа растительности, температуры, влажности и фазового состава влаги [Жилинская, 2006].

Микроволновое излучение подстилающей поверхности зависит от температуры, влажности и биомассы растительности, типа подстилающей поверхности (вода, незамерзшая или мерзлая почва) и ее физических свойств (для воды – температура и соленость, для почвы – температура, влажность, глубина промерзания). Для одновременной оценки характеристик почвы и растительности используются синхронные оптические и микроволновые измерения, позволяющие оценить влажность почвы и оптическую толщину растительного покрова, зависящую от влажности надземного слоя растительности. Разработана методика определения влажности почвы и оптической толщины растительного покрова по радиояркостным температурам, измеренным в двух диапазонах длин волн на вертикальной и горизонтальной поляризациях [Сагалович, 2005].

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И РАДИОИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУНДРОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

1.1. Основные характеристики микроволнового излучения подстилающей поверхности

Основной характеристикой, описывающей диэлектрические свойства материальных сред, является комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) [Шарков, 2014]:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (1.1)$$

где ε' – действительная, а $\varepsilon'' = 60\sigma\lambda$ – мнимая части КДП, i – мнимая единица.

Выражение (1.1) иногда записывают в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon' \cdot \left(1 + i \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right) = \varepsilon' \cdot (1 + tg\delta), \quad (1.2)$$

где $tg\delta$ – тангенс угла потерь.

Мнимая часть КДП характеризует потери энергии на поляризационное смещение заряженных частиц и создание токов проводимости в веществе. Она содержит поляризационную часть ε_p'' и вклад проводимости:

$$\varepsilon'' = \varepsilon_p'' + 60\sigma\lambda, \quad (1.3)$$

где σ – удельная проводимость, λ – длина волны. При записи формул (1.1) и (1.2) использована система единиц СИ.

Частотные зависимости действительной ε' и мнимой ε'' частей КДП, могут быть описаны известными формулами Дебая, имеющими вид:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{ОПТ} + \frac{\varepsilon_{СТАТ} - \varepsilon_{ОПТ}}{1 + (f / f_{\tau})^2}, \quad (1.4)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_{СТАТ} - \varepsilon_{ОПТ}) \cdot (f / f_{\tau})}{1 + (f / f_{\tau})^2} + 60\sigma\lambda, \quad (1.5)$$

где f – частота электромагнитного излучения, $f_{\tau} = (2\pi\tau)^{-1}$ – релаксационная частота, τ – время релаксации, $\varepsilon_{СТАТ}$ и $\varepsilon_{ОПТ}$ – статическая (на частоте $f \approx 0$) и оптическая (в диапазоне оптических частот) диэлектрические проницаемости образца, соответственно.

Наряду с диэлектрической проницаемостью используют также комплексный коэффициент преломления

$$N = \sqrt{\varepsilon} = n + i\kappa, \quad (1.6)$$

где n и κ – показатели преломления и поглощения, соответственно.

Из (1.1) и (1.4) можно получить выражения, устанавливающие связь между действительной и мнимой частями КПД и показателями преломления и поглощения:

$$\begin{cases} \varepsilon' = n^2 - \kappa^2 \\ \varepsilon'' = 2n\kappa \end{cases}. \quad (1.7)$$

Для описания отражательных характеристик плоской электромагнитной волны от границы раздела «свободное пространство / диэлектрик» используются энергетические коэффициенты отражения для горизонтальной (r_H) и вертикальной (r_V) поляризаций падающего поля:

$$r_H = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}} \right|^2, \quad (1.8)$$

$$r_V = \left| \frac{\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right|^2, \quad (1.9)$$

где θ – угол, отсчитанный от нормали к поверхности. При зондировании в надир ($\theta = 0$), выражения (1.8) и (1.9) примут следующий вид:

$$r = r_H = r_V = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right|^2. \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) справедливо для гладких поверхностей с однородным распределением электродинамических параметров по глубине. Поверхность является гладкой, если при облучении она отражает падающую волну зеркально, и шероховатой, если отражение носит диффузный характер. Практически можно считать, что зеркальное отражение имеет место в том случае, когда для максимальных вертикальных размеров неровностей h_{\max} выполняется критерий шероховатости Рэлея:

$$h_{\max} \leq \frac{\lambda}{16 \cos \theta}, \quad (1.11)$$

где λ – длина электромагнитной волны в первой среде (воздухе).

Для описания радиоизлучательных характеристик дисперсных сред используются радиояркость температура T_B и коэффициент излучения χ , который может быть выражен через коэффициенты отражения (1.8) и (1.9):

$$\chi_{H,V} = 1 - r_{H,V}. \quad (1.12)$$

Коэффициент излучения χ , связан с n и k формулой [Комаров С.А., 1997]:

$$\chi = \frac{4n}{(n+1)^2 + \kappa^2}, \quad (1.13)$$

Радиояркостьная температура T_B связана с коэффициентом излучения χ , и термодинамической температурой T соотношением [Шарков, 2014]:

$$T_B = \chi \cdot T. \quad (1.14)$$

1.2. Методика диэлектрических измерений и использованная аппаратура

Отбор образцов почвы и растительности производился в Ямальском, Надымском, Тазовском районах Ямало-Ненецкого автономного округа на тестовых участках, различающихся по степени развития растительного покрова и вида растительности, а также на почвах без растительности.

Для измерения диэлектрических характеристик тундровой растительности использовался метод мостовых схем хорошо себя зарекомендовавший при изучении диэлектрических характеристик древесины [Романов А.Н., 2006]. Основное внимание уделено измерениям диэлектрических характеристик тундровой растительности в интервале температур, соответствующих интенсивным фазовым переходам. Для этого производилось охлаждение измерительного волноводного контейнера с растительным образцом внутри.

Экспериментальные исследования диэлектрической проницаемости почв проводились с помощью лабораторной установки, предназначенной для измерений диэлектрических свойств жидких и сыпучих материалов. Установка работает по принципу мостовых измерений. Блок-схема установки, соб-

ранной на базе промышленного измерителя разности фаз и отношения амплитуд ФК2-18, изображена на рисунке 1.1.

В состав установки входят следующие элементы: Г – генератор сигналов высокочастотный типа Г4-78 (1.16–1.78 ГГц), ДМ – делитель мощности согласованный; ЛПД – линия переменной длины; А1, А2, А3 – аттенюаторы согласующие коаксиальные; И – измерительный блок фазометра; К – контейнер для образца, выполненный в виде коаксиального отрезка линии.

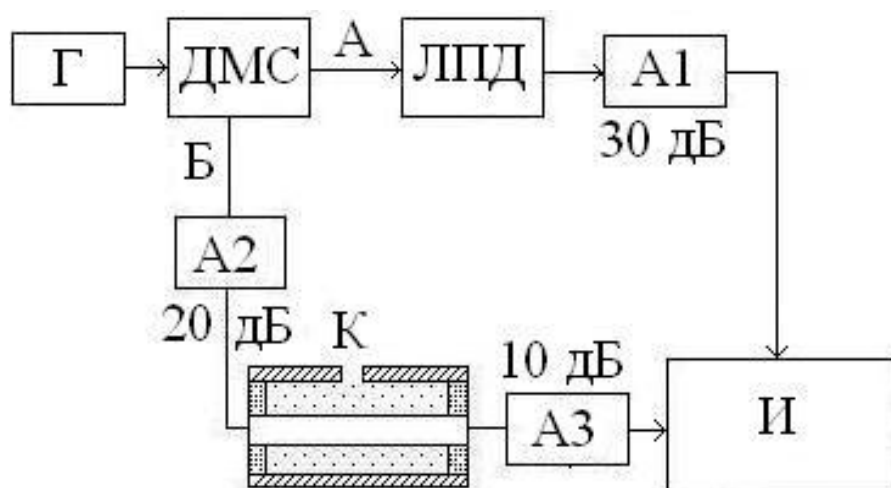


Рис. 1.1. Схема установки мостового типа на основе измерителя разности фаз

Интерпретирующие формулы, служащие для расчетов КДП по результатам измерений в мостовых схемах, получаются из решения электродинамической задачи о прохождении волны через слой диэлектрика конечной толщины, помещенного в однородную регулярную линию передачи. Измеряемыми величинами являются модуль ослабления $|A|$ и фаза φ комплексного коэффициента прохождения, которые могут быть пересчитаны в действительную и мнимую части КДП либо в КПП.

Процесс измерений заключался в следующем. С помощью ДМ производилась балансировка мостовой схемы, в плечо которой устанавливался пустой эталонный контейнер, по амплитудным и фазовым характеристикам идентичный измерительному. Сигнал от генератора подается на ДМ и делится поровну между опорным (А) и измерительным (Б) каналами. В начале измерений, при отсутствии в контейнере исследуемого образца, устанавливалось нулевое значение разности фаз и амплитуд на фазометре. Практически для начальной балансировки моста использовался эталонный пустой контейнер, конструктивно эквивалентный рабочему с такими же метрологическими характеристиками. Затем вместо эталонного устанавливался контейнер с образцом и по индикатору измерителя ФК2-18 отсчитывались значения разности фаз и затухание.

Согласно паспортным данным ФК2-18, диапазон однозначных измерений фазы составляет $\pm 180^\circ$; диапазон измерения ослабления – от 0 до 60 дБ; погрешности измерения ослабления и фазы составляли 0.2 дБ и 0.2° . Это соответствует относительной погрешности не более 7% для коэффициента излучения χ , расчет которого производился для угла визирования 42.5° .

Для установления зависимостей коэффициента излучения почвы от объемной влажности $\chi(W)$ исследуемый образец помещался в сушильный шкаф до полного удаления воды, что соответствовало объемной влажности $W = 0$. После этого измерялись диэлектрические характеристики сухого образца. Для изменения объемной влажности образца растительности производилось его высушивание при комнатной температу-

ре, после чего измерялись диэлектрические характеристики увлажненного образца.

Объемная влажность определялась по формуле:

$$W = \frac{\rho}{\rho_B} Z_B \quad (1.15)$$

где $Z_B = M_B/M$ и $M_B = M - M_{\text{сух}}$ – массовая доля и масса содержащейся в образце воды; M и $M_{\text{сух}}$ – массы влажного и высушенного образцов; ρ и $\rho_B \approx 1 \text{ г/см}^3$ – плотности образца и воды, соответственно.

При установлении температурной зависимости $\chi(T)$ исследуемый образец почвы или растительности охлаждали до температуры -8°C , затем измеряли диэлектрические параметры при постепенном повышении температуры до значения $+20^\circ\text{C}$.

Данные лабораторных измерений использовались для построения эмпирических зависимостей $\chi(W)$ и $\chi(T)$ на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Радиояркость температура подстилающей поверхности рассчитывалась по формуле (1.14).

1.3. Результаты экспериментальных исследований

1.3.1. Влияние объемной влажности на диэлектрические свойства растительности

На диэлектрические и радиоизлучательные характеристики тундровой растительности заметное влияние оказывает содержащаяся в растении вода, фазовый состав и диэлектрические свойства которой могут различаться для разных видов

растительности, а также для разных элементов растительности одного вида (корни, листья, стебель). При отмирании растительности, образовании перегноя, торфа происходит изменение фазового состава воды и, соответственно, изменение диэлектрических характеристик растительности.

На рисунке 1.2 приведены эмпирические зависимости диэлектрических характеристик $n(W)$ (1, 2) и $\kappa(W)$ (1', 2') от объемной влажности для ягеля (а), сфагнома (торфяного мха) и торфа (б), бриевых мхов и корневой системы с фрагментами отмершей растительности (в), аппроксимированные прямыми линиями (1.16), (1.17) с помощью математического пакета Origin 6.1.

$$n = A_0 + A_1 \cdot W, \quad (1.16)$$

$$\kappa = B_0 + B_1 \cdot W, \quad (1.17)$$

где A_0, A_1, B_0, B_1 – численные коэффициенты, приведенные в таблице 1.1.

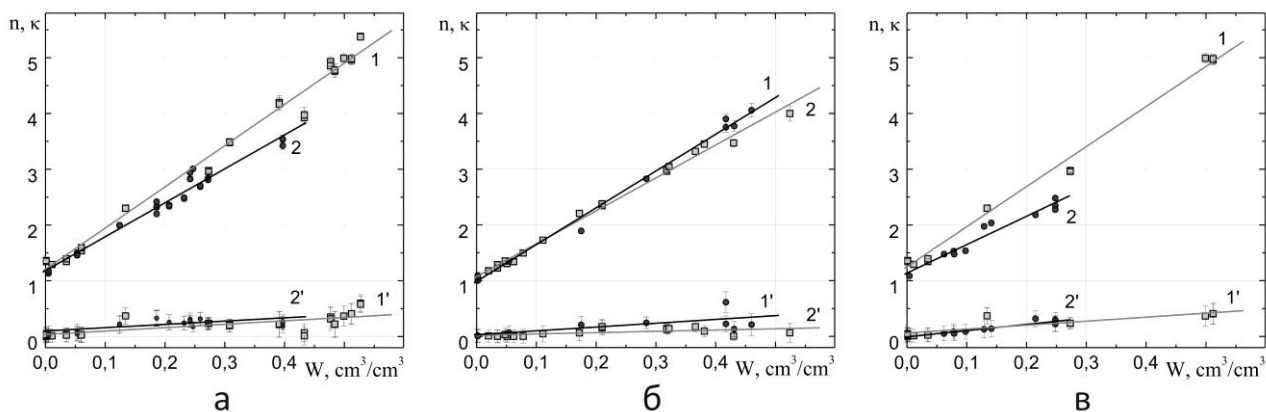


Рис. 1.2. Зависимости показателей преломления (1, 2) и поглощения (1', 2') от объемной влажности: а) ягель живой (1, 1'), ягель отмерший (2, 2'); б) сфагнум (1, 1'), торф (2, 2'); в) мох бриевый (1, 1'), корни и фрагменты отмерших растений (2, 2')

Из сравнения экспериментальных данных следует, что диэлектрические характеристики высушенной растительности разных видов в пределах погрешности различаются незначительно. Основное различие наблюдается при увеличении влажности. Это может быть связано с различным поведением диэлектрических свойств воды в разных видах растительности, изменением фазового состава воды в растениях при их отмирании, различием диэлектрических свойств воды разного фазового состава, присутствующей в живых и погибших растениях.

Таблица 1.1. Численные значения коэффициентов в выражениях (1.16), (1.17)

Вид растения	A_0	A_1	σ_n	B_0	B_1	σ_k
Ягель живой	1.20±0.06	7.4±0.17	0.185	0.04±0.03	0.60±0.11	0.125
Ягель отмерший	1.18±0.05	6.1±0.20	0.121	0.10±0.03	0.60±0.13	0.080
Мох-сфагнум	0.99±0.06	6.6±0.21	0.118	0.03±0.07	0.70±0.24	0.136
Торф	1.07±0.03	5.9±0.13	0.086	0.02±0.02	0.23±0.09	0.056
Мох бриевый	1.14±0.07	5.1±0.41	0.110	0.001±0.2	1.10±0.15	0.040
Корневая система	1.25±0.05	7.2±0.19	0.140	0.06±0.03	0.70±0.13	0.096

σ_n , σ_k – среднеквадратические погрешности определения n и k .

С использованием соотношений (1.16), (1.17) по формуле (1.13) рассчитывались коэффициенты излучения χ для разных значений W . Зависимости $\chi(W)$ для живого ($\chi_{ж}$) и погибшего ($\chi_{п}$) ягеля, аппроксимированные прямыми линиями, имеют вид:

$$\chi_{ж} = (0.98 \pm 0.006) - (0.846 \pm 0.018) \cdot W, \sigma = 0.0195, \quad (1.18)$$

$$\chi_{п} = (0.99 \pm 0.007) - (0.82 \pm 0.031) \cdot W, \sigma = 0.0179, \quad (1.19)$$

Преобразовав соотношения (1.18) и (1.19), получим выражения для дистанционного определения объемных влажностей живого и отмершего ягеля:

$$W = (1.18 \pm 0.037) - (1.18 \pm 0.044) \cdot \chi_{ж}, \sigma = 0.021, \quad (1.20)$$

$$W = (1.13 \pm 0.018) - (1.14 \pm 0.023) \cdot \chi_{п}, \sigma = 0.022. \quad (1.21)$$

1.3.2. Влияние температуры на диэлектрические свойства растительности

Значительную часть года тундровая растительность находится при отрицательных температурах окружающей среды. В этот период вода, находящаяся вне растений и не связанная сорбционными силами с их поверхностью, замерзает, обращаясь в лед. В то же время вода, находящаяся в самих растениях, может оставаться в разных количествах в незамерзшем состоянии при очень низких температурах (до -75°C) [Бордонский, 2008].

На рисунке 1.3 приведены графики зависимостей $n(t)$ и $\kappa(t)$ для ягеля, сфагнома и торфа, аппроксимированные сигмоидальными функциями, имеющими следующий вид:

$$n = n_2 + (n_1 - n_2) / \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right), \quad (1.22)$$

$$\kappa = \kappa_2 + (\kappa_1 - \kappa_2) / \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right), \quad (1.23)$$

где n_1 , κ_1 и n_2 , κ_2 – начальные и конечные значения показателей преломления и поглощения, t_0 и dt – средняя температура и ширина фазового перехода. Численные значения вели-

чин, входящих в формулы (1.22), (1.23) для разных типов живой и отмершей растительности приведены в таблице 1.2.

На рисунке 1.3а приведены зависимости показателей преломления (1, 2) и поглощения (1', 2') живого (1) и отмершего (2) ягеля от температуры в диапазоне от -12 до +20°C. Для измерений использовался один и тот же образец ягеля, имевший до высушивания объемную влажность $W = 0.4$, после высушивания повторно увлажненный до $W = 0.15$. Видно, что в интервале измеренных температур наблюдаются не только количественные, но и качественные различия зависимостей $n(t)$ и $\kappa(t)$, заключающиеся в различной ширине фазовых переходов. Для отмершего ягеля значения n и κ при повышении температуры изменяются скачкообразно, а для живого растения фазовый переход плавный, что может быть обусловлено замерзанием связанной воды в некотором интервале температур ниже 0°C.

Таблица 1.2. Численные значения коэффициентов в выражениях (1.22), (1.23)

	n_1	n_2	t_0	dt	σ_n
Ягель живой	1.27±0.02	2.01±0.016	-0.87±0.23	1.88±0.22	1.88
Ягель отмерший	1.49±0.017	2.97±0.009	-1.77±0.03	0.52±0.02	3.85
Сфагнум	1.46±0.028	6.66±0.05	0.21±0.05	1.41±0.03	2.70
Торф	2.39±0.02	7.33±0.02	0.67±0.02	0.98±0.016	1.00
	κ_1	κ_2	t_0	dt	σ_κ
Ягель живой	0.08±0.005	0.19±0.003	-1.92±0.29	1.2±0.24	0.001
Ягель отмерший	0.037±0.007	0.3±0.006	-1.4±0.07	0.28±0.04	0.007
Сфагнум	0.26±0.24	4.63±0.4	6.9±0.53	1.21±0.03	0.820
Торф	0.44±0.04	0.81±0.03	-0.48±0.2	0.26±0.2	0.060

При $t > 0^\circ\text{C}$ значения n и κ отмершего ягеля значительно превышают значения n и κ живого ягеля. Так как влажность живого ягеля значительно выше влажности отмершего ягеля, то подобное поведение диэлектрических свойств может быть обусловлено различием фазового состава воды в живом и отмершем ягеле, в частности большей долей связанной воды и меньшей долей свободной воды, содержащейся в живом ягеле по сравнению с отмершим ягелем. В ягеле, представляющем собой симбиотическую ассоциацию грибов и микроскопических водорослей, при нагревании разрушается внутренняя структура микроводоросли. В результате этого вода, содержавшаяся внутри микроводоросли или в ее клеточной мембране и относящаяся по фазовому составу к категории связанной воды, переходит в категорию свободной воды, значения n и κ которой заметно выше n и κ связанной воды.

Заметные различия n и κ наблюдаются для сфагнома и торфа. Из рисунка 1.3б видно, что для сфагнома на зависимости $\kappa(t)$ (1') имеется два интервала температур ($-2 \div -1^\circ\text{C}$ и $5 \div 8^\circ\text{C}$), в которых происходит резкое (скачкообразное) изменение поведения диэлектрических свойств сфагнома. Это связано с особенностями внутреннего строения сфагнома, в частности с существованием пустых полостей, в которых может накапливаться вода в количестве, многократно превышающем массу самого растения.

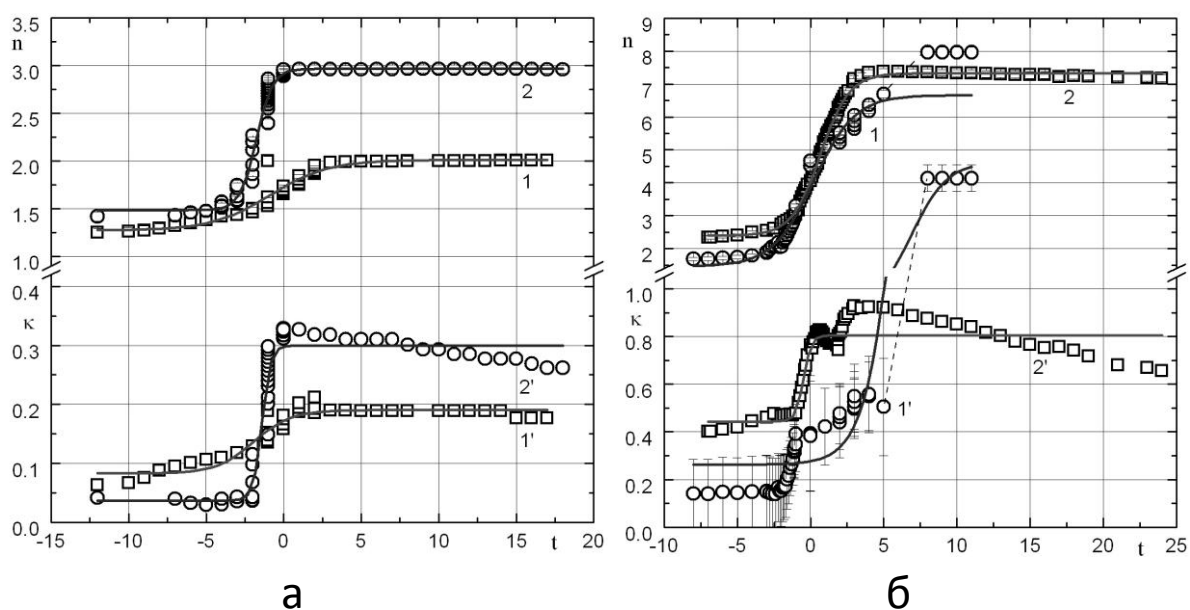


Рис. 1.3. Зависимости показателей преломления (1, 2) и поглощения (1', 2') от температуры: а) ягель живой (1, 1'), отмерший (2, 2'); б) сфагнум (1, 1'), торф (2, 2')

В интервале температур от -8 до -2 °C часть воды находится в виде льда вне растения. При его таянии образуется свободная вода с высокими значениями n и k , что обуславливает резкий рост величины k . Возрастание k в интервале температур от -2 до $+5$ °C может быть вызвано постепенным таянием льда, образовавшегося в пустотелых клетках сфагнума и окруженного клеточной мембраной. Таяние льда в этих клетках происходит с задержкой по сравнению с льдом, находящимся вне растения. В интервале от $+5$ до $+12$ °C диэлектрические характеристики сфагнума близки к диэлектрическим характеристикам пресной воды.

С использованием экспериментальных данных по формуле (1.13) были рассчитаны коэффициенты излучения для ягеля, сфагнума, торфа. Зависимости коэффициентов излучения от температуры в диапазоне от -12 до $+20$ °C, приведенные на

рисунке 1.4, аппроксимировались сигмоидальной функцией, имеющей вид:

$$\chi = \frac{\chi_1 - \chi_2}{1 + \exp\left[\frac{t - t_0}{dt}\right]} + \chi_2, \quad (1.24)$$

где χ_1, χ_2 – начальное и конечное значения коэффициентов излучения, t_0 и dt – средняя температура и ширина фазового перехода.

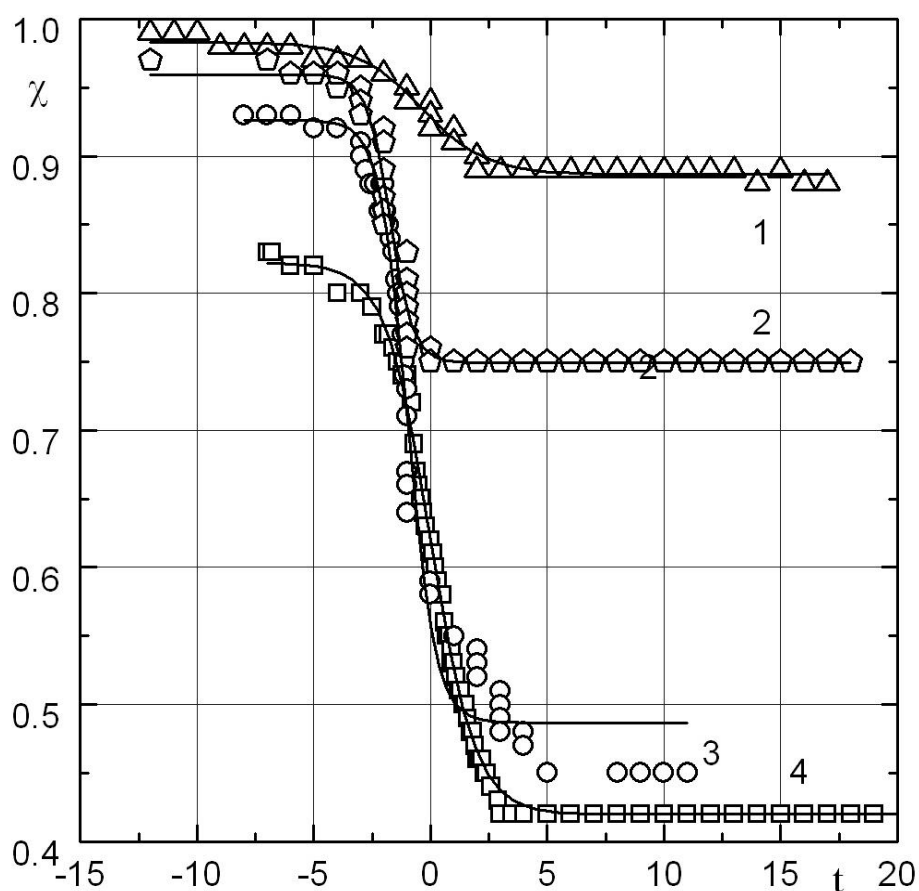


Рис. 1.4. Зависимости коэффициентов излучения от температуры для живого ягеля (1), отмершего ягеля (2), сфагнума (3) и торфа (4)

В полученном выражении (1.24) величины χ_1, χ_2, t_0 и dt , значения которых приведены в таблице 1.3, характеризуют радиоизлучательные свойства разных видов растительности и

могут быть измерены в лабораторных условиях. Значения χ и t могут быть определены контактным или дистанционным способом.

Таблица 1.3. Численные значения коэффициентов в выражении (1.24)

	χ_1	χ_2	t_0	dt	σ_χ
Ягель живой	0.98±0.002	0.89±0.001	-0.35±0.13	1.39±0.12	0.0003
Ягель отмерший	0.96±0.004	0.75±0.003	-1.74±0.05	0.49±0.04	0.0002
Сфагнум	0.93±0.011	0.49±0.008	-0.98±0.06	0.60±0.07	0.0008
Торф	0.82±0.003	0.42±0.002	0.005±0.03	0.97±0.02	0.0005

1.3.3. Диэлектрические характеристики тундровой растительности на разных частотах в микроволновом диапазоне

Диэлектрические характеристики тундровой растительности на разных частотах исследовались в диапазоне от 0.43 до 1.78 ГГц. Выбор этого диапазона обусловлен тем, что на этих частотах разработаны микроволновые радиометры, и накоплен база данных диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв, воды, растительности.

На рисунке 1.5 приведены частотные зависимости показателей преломления (1а) и поглощения (2а), действительной (1б) и мнимой (2б) комплексной диэлектрической проницаемости и коэффициента излучения (в) для мха, отобранного в декабре в тундре (окрестности г. Надым).

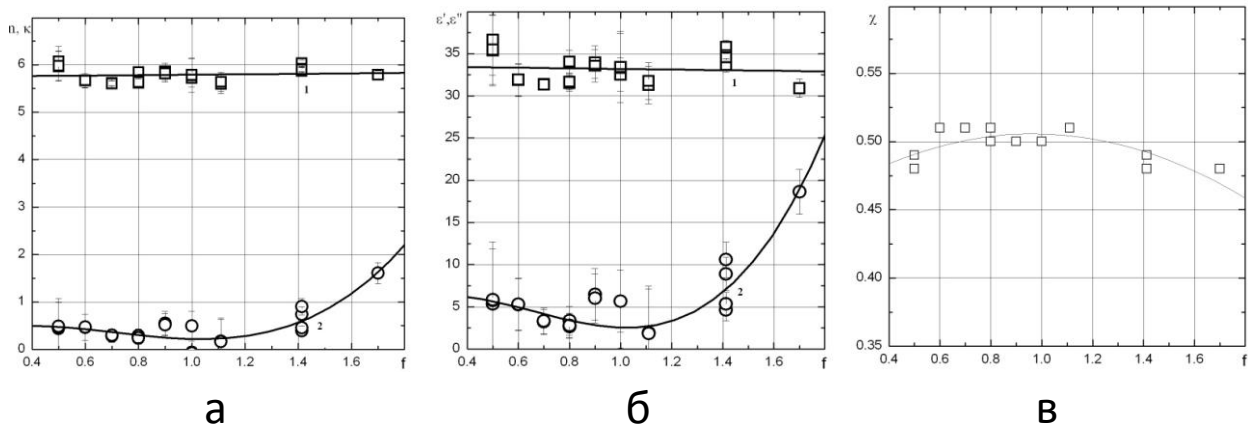


Рис. 1.5. Частотные зависимости показателей преломления (1а) и поглощения (2а), действительной (1б) и мнимой (2б) комплексной диэлектрической проницаемости и коэффициента излучения (в) для мха

Установленные зависимости имеют следующий вид:

1. Зависимости показателей преломления (n) и поглощения (k) от частоты (f):

$$n(f) = 5.74 + 0.046 \cdot f, \sigma = 0.15,$$

$$k(f) = 0.138 + 2.235 \cdot f - 4.08 \cdot f^2 + 1.933 \cdot f^3, \sigma = 0.18.$$

2. Зависимости действительной (ε') и мнимой (ε'') комплексной диэлектрической проницаемости от частоты:

$$\varepsilon'(f) = 33.56 - 0.36 \cdot f, \sigma = 1.75$$

$$\varepsilon''(f) = 3.78 + 18.94 \cdot f - 40.54 \cdot f^2 + 20.37 \cdot f^3, \sigma = 2.16$$

3. Зависимость коэффициента излучения χ от частоты:

$$\chi(f) = 0.44 + 0.13 \cdot f - 0.068 \cdot f^2, \sigma = 0.009$$

Установленные частотные зависимости позволяют рассчитать коэффициенты излучения на любой частоте в микроволновом диапазоне от 400 МГц до 1.78 ГГц.

Для сравнения на рисунке 1.6 приведены зависимости коэффициентов излучения на трёх частотах 500 МГц, 1.11 и 1.413 ГГц от температуры, аппроксимированные зависимостями вида (1.24). Соответствующие значения эмпирических коэффициентов χ_1 , χ_2 , t_0 и dt приведены в таблице 1.4.

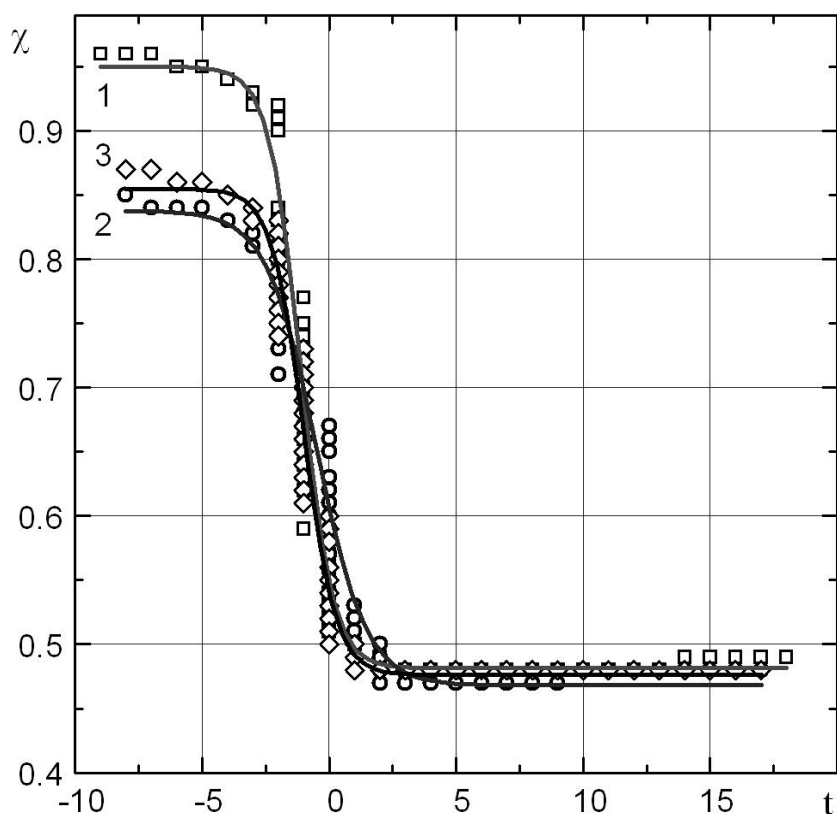


Рис. 1.6. Зависимости коэффициентов излучения мха от температуры на частотах 500 МГц (1), 1.11 ГГц (2) и 1.413 ГГц (3)

Из сравнения графиков видно, что зависимости $\chi(t)$, измеренные на разных частотах, заметно различаются в диапазоне отрицательных температур. Возможные причины этих различий могут быть связаны с различным поведением диэлектрических характеристик связанной воды, присутствующей в замерзшем образце тундровой растительности, а также с тем, что частота релаксации связанной воды близка к исследуемому интервалу частот [Комаров, 1999]. В образце рас-

тельности при отрицательной температуре присутствует лед, при положительной температуре в результате таяния превращающийся в воду.

Таблица 1.4. Численные значения коэффициентов в выражении (1.24) для мха на разных частотах

Частота сигнала	χ_1	χ_2	t_0	dt	σ_χ
500 МГц	0.950±0.012	0.480±0.008	-1.13±0.07	0.63±0.06	0.0012
1.11 ГГц	0.840±0.014	0.470±0.008	-0.51±0.13	0.98±0.13	0.0012
1.413 ГГц	0.855±0.009	0.476±0.006	-1.01±0.06	0.63±0.05	0.0007

Влияние связанной воды на диэлектрические свойства растительности при положительных температурах менее заметно, так как диэлектрические характеристики воды заметно превышают диэлектрические характеристики свободной воды. Соответственно с этим, влияние связанной воды оказывается менее заметным в интервале положительных температур.

Установленные на разных частотах зависимости $\chi(t)$ могут быть использованы при исследовании влияния фазового состава воды, находящейся в тундровой растительности на микроволновое излучение подстилающей поверхности. Дистанционное зондирование подстилающей поверхности на нескольких частотах расширяет возможности интерпретации спутниковых данных.

1.3.4. Влияние плотности и влажности на диэлектрические характеристики тундровой растительности

При разработке дистанционных методов зондирования растительного покрова одной из важных проблем является необходимость изучения влияния плотности растительности на ее диэлектрические свойства. С этой целью проводились измерения диэлектрических характеристик тундровой растительности (мхи, лишайники, ягель) на частоте 1.41 ГГц.

Так как при изучении влияния плотности на диэлектрические характеристики необходимо учитывать другие физические характеристики растительности (влажность и температура), которые могут внести существенную ошибку в результаты расчетов, для измерений выбирались высушенные образцы с объемной влажностью $W = 0$, измерения проводились при температуре 25°C.

На рисунке 1.7 приведены зависимости показателей преломления и поглощения образцов сухой растительности (ягель, сфагнум, тундровые злаки) от плотности ρ_{CVX} . Из графиков видно, что значения показателя преломления незначительно возрастают в исследованном интервале плотностей, а значения показателя поглощения в пределах погрешности от плотности не зависят. Эмпирические зависимости $n(\rho_{CVX})$, $\kappa(\rho_{CVX})$, $\varepsilon'(\rho_{CVX})$, $\varepsilon''(\rho_{CVX})$, $\chi(\rho_{CVX})$ для сухой тундровой растительности, приведенные на рисунке 1.7, были аппроксимированы полиномами первой степени:

$$n = 1.14 + 0.14 \rho_{CVX}, \sigma = 0.126, \quad (1.25)$$

$$\kappa = 0.028 + 0.0139 \rho_{CVX}, \sigma = 0.044. \quad (1.26)$$

$$\varepsilon' = (1.33 \pm 0.028) + (0.29 \pm 1.32)\rho_{\text{сух}}, \sigma = 0.3 \quad (1.27)$$

$$\varepsilon'' = (0.84 \pm 0.11) - (0.03 \pm 0.5)\rho_{\text{сух}}, \sigma = 0.12 \quad (1.28)$$

где $\rho = 0.1 \div 0.35 \text{ г/см}^3$ – плотность сухой растительности.

На основе установленных зависимостей (1.25) – (1.28) были рассчитаны зависимости коэффициента излучения от плотности, имеющие следующий вид:

$$\chi = 0.988 + 0.0137 \rho_{\text{сух}}, \sigma = 0.01 \quad (1.29)$$

Из установленных зависимостей следует, что сухая тундровая растительность характеризуется низкой поглощательной способностью радиоволн и в микроволновом диапазоне является радиопрозрачной.

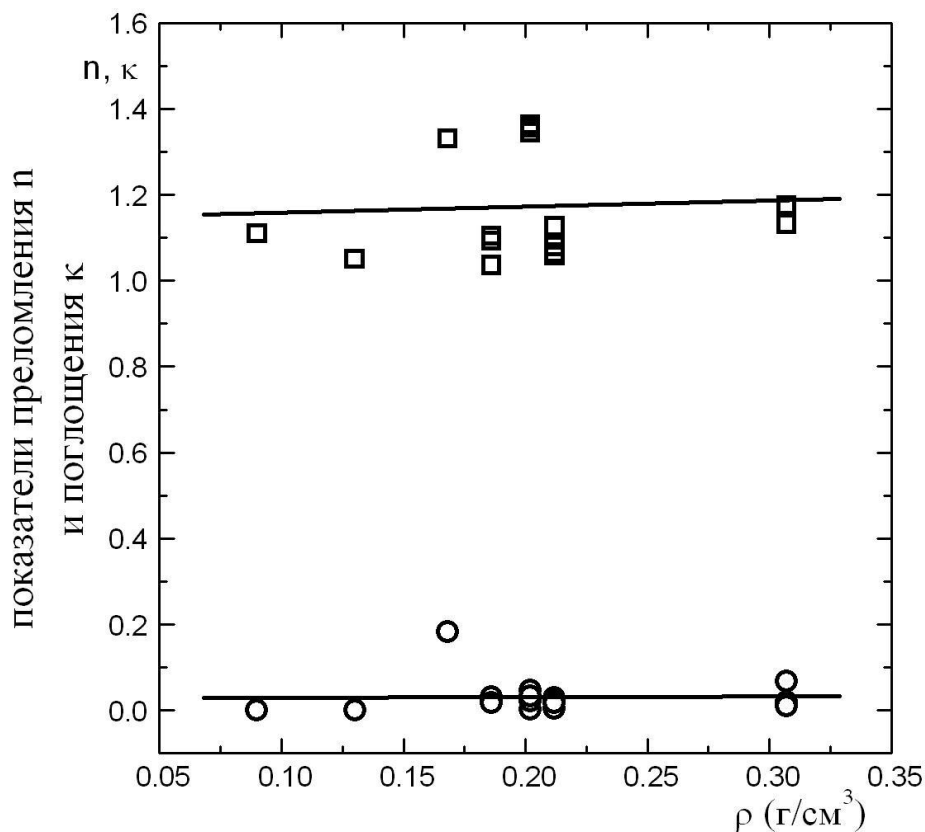


Рис. 1.7. Зависимости показателей преломления и поглощения сухой тундровой растительности от плотности на частоте 1.41 ГГц

Наличие даже малых количеств воды (сока) в растении может существенным образом изменить диэлектрические характеристики растительности. Зависимости диэлектрических характеристик от плотности для малоувлажненной ($0 < W < 0.06 \text{ см}^3/\text{см}^3$) растительности также были аппроксимированы полиномами первой степени:

$$n = 1.0 \pm 0.41\rho, \sigma = 0.039, \quad (1.30)$$

$$\kappa = 0.0 + (0.146\rho, \sigma = 0.016, \quad (1.31)$$

$$\varepsilon' = 1.0 + 0.918\rho, \sigma = 0.085, \quad (1.32)$$

$$\varepsilon'' = 0.0 + 0.325\rho, \sigma = 0.035, \quad (1.33)$$

$$\chi = 1.0 - 0.0258\rho, \sigma = 0.001. \quad (1.34)$$

Зависимости диэлектрических и радиоизлучательных характеристик растительности от W при вариациях плотности в интервале изменения ρ от 0.1 до 0.35 г/см³ имеют следующий вид:

$$n = (1.02 \pm 0.03) + (7.06 \pm 0.13)W, \sigma = 0.22, \quad (1.35)$$

$$\kappa = (0.08 \pm 0.015) + (0.59 \pm 0.06)W, \sigma = 0.097, \quad (1.36)$$

$$\varepsilon' = (1.38 \pm 0.33) + (7.63 \pm 2.8)W + (63 \pm 4)W^2, \sigma = 1.7, \quad (1.37)$$

$$\varepsilon'' = (0.12 \pm 0.1) + (3.7 \pm 1.2)W + (5.3 \pm 1.7)W^2, \sigma = 0.73, \quad (1.38)$$

$$\chi = (0.994 \pm 0.006) - (0.78 \pm 0.016) \cdot W, \sigma = 0.02. \quad (1.39)$$

Обратная зависимость $W(\chi)$ имеет вид:

$$W = (1.26 \pm 0.022) - (1.265 \pm 0.025) \cdot \chi, \sigma = 0.03. \quad (1.40)$$

Данная обобщенная зависимость (1.40), построенная на основе экспериментальных измерений диэлектрических характеристик ягеля, мхов, тундровых злаков для интервала по-

ложительных температур, может быть использована при оценке влажностных характеристик растительного покрова по измеренным дистанционным способом радиоизлучательным характеристикам подстилающей поверхности тундры при условии, что микроволновое излучение формируется растительным покровом. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы 1) занятая растительностью площадь была больше пикселя микроволнового радиометра (превышала разрешающую способность радиометра); 2) толщина растительного покрова превышала скин-слой растительности на данной длине волны.

1.3.5. Диэлектрические характеристики карликовой древесной растительности в микроволновом диапазоне

Значительное влияние на микроволновое излучение подстилающей поверхности тундры оказывают заросли кустарников и древесной растительности карликового типа, в первую очередь, карликовой березы и карликовой ивы. В зависимости от биомассы, проективного покрытия и занимаемой площади, попадающей в пиксель микроволнового радиометра, древесная растительность может полностью экранировать микроволновое излучение нижележащей мерзлой или сезонно-талой почвы. Важнейшим вопросом, возникающим при интерпретации данных дистанционного зондирования бореальной растительности, является вопрос сезонных изменений диэлектрических и радиоизлучательных характеристик карликовой ивы и карликовой березы, связанных с изменением количества древесного сока в растении в разные сезоны года. Судя по отсутствию публикаций в международных научных

журналах по данной тематике, этот вопрос исследован недостаточно.

В ходе выполнения проекта проводились лабораторные измерения диэлектрических и радиоизлучательных характеристик образцов карликовой березы и карликовой ивы, отобранных на тестовых участках в Ямало-Ненецком автономном округе в разные сезоны года. Диэлектрические характеристики древесных образцов измерялись при разных температурах в интервале от -8 до $+17^{\circ}\text{C}$ (от 265 до 290 К).

На рисунках 1.8, 1.9 приведены графики зависимостей $n(T)$, $\kappa(T)$, $\varepsilon'(T)$, $\varepsilon''(T)$, $\chi(T)$ от температуры (в Кельвинах) для карликовой березки и карликовой ивы, аппроксимированные сигмоидальными функциями вида:

$$n = n_2 + (n_1 - n_2) / \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right), \quad (1.41)$$

$$\kappa = \kappa_2 + (\kappa_1 - \kappa_2) / \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right), \quad (1.42)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon'_2 + (\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2) / \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right) \quad (1.43)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_2 + (\varepsilon''_1 - \varepsilon''_2) / \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right) \quad (1.44)$$

$$\chi = \chi_2 + (\chi_1 - \chi_2) / \left(1 + \exp \left[\frac{t - t_0}{dt} \right] \right), \quad (1.45)$$

где индексы 1 и 2 – начальные и конечные значения соответствующих величин, T_0 и dT – средняя температура и ширина фазового перехода.

Численные значения коэффициентов, входящих в формулы (1.41) – (1.45), для карликовой березки и карликовой ивы приведены в таблицах 1.5 и 1.6, соответственно. Из анализа приведенных зависимостей, а также численных значений коэффициентов следует, что диэлектрические и радиоизлучательные характеристики карликовой березы и карликовой ивы в разное время года (август, ноябрь, апрель) заметно отличаются. Причиной наблюдаемых отличий может быть разное количество древесного сока в растениях, диэлектрические характеристики которого, близкие по своим значениям к воде, сильно отличаются от значений для сухой древесной растительности.

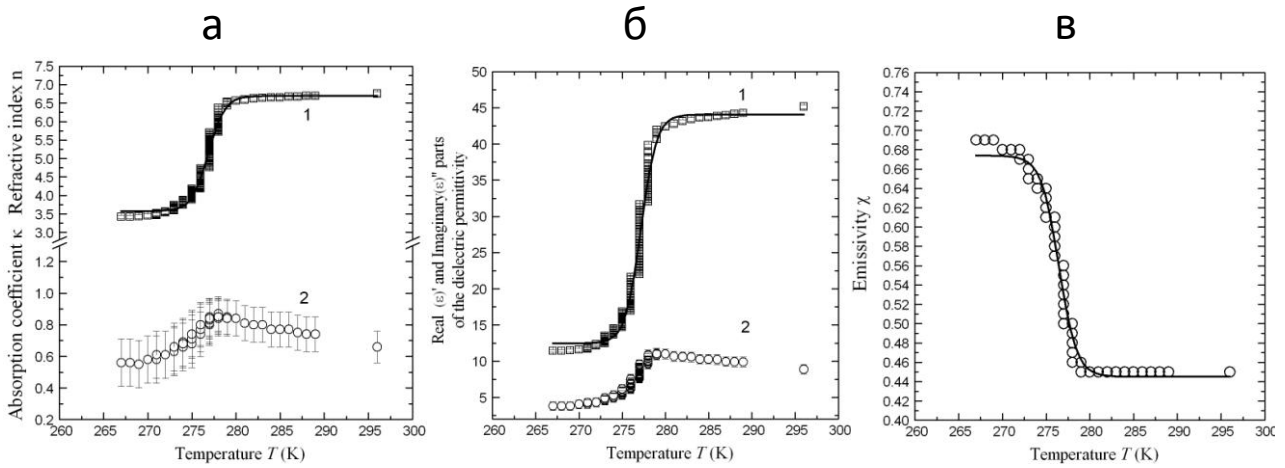
Из этого следует вывод о необходимости учета сезонных различий диэлектрических и радиоизлучательных характеристик древесной растительности тундры для повышения точности и надежности существующих и разрабатываемых методов интерпретации данных дистанционного микроволнового зондирования.

Таблица 1.5. Численные значения коэффициентов в выражениях (1.41) – (1.45) для карликовой березы

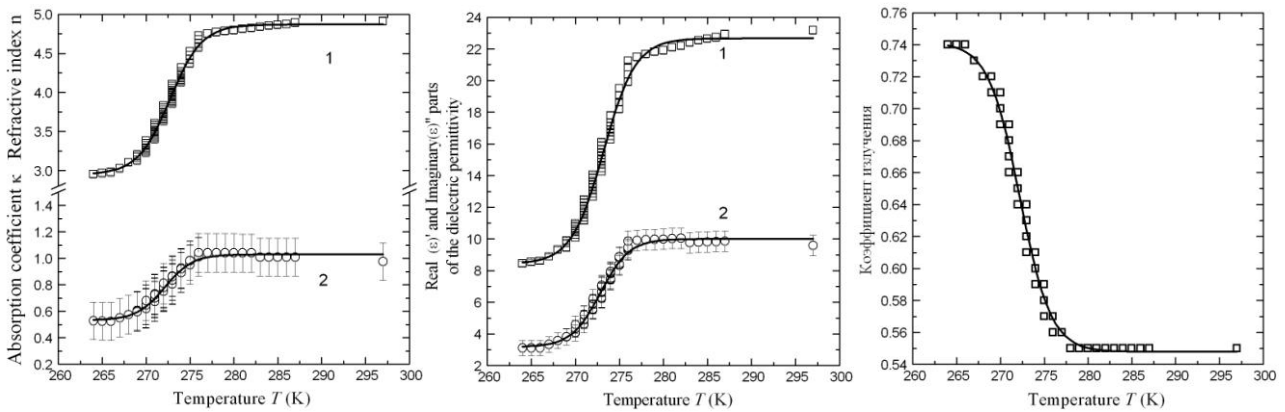
	W	ρ_p	ρ_s	n_1	n_2	T_0	dT
август	0.38	0.72	0.34	3.56±0.01	6.7±0.01	276.8±0.1	0.938±0.01
ноябрь	0.236	0.53	0.30	2.95±0.03	4.87±0.02	272.7±0.08	1.82±0.07
апрель	0.232	0.55	0.32	3.0±0.025	4.21±0.02	274.8±0.11	1.74±0.1
				κ_1	κ_2	T_0	dT
август	0.38	0.72	0.34	-	-	-	-
ноябрь	0.236	0.53	0.30	0.53±0.07	1.03±0.04	272.1±0.7	1.586±0.6
апрель	0.232	0.55	0.32	0.52±0.06	0.79±0.04	273.8±0.04	1.31±0.9
				ε'_1	ε'_2	T_0	dT
август	0.38	0.72	0.34	12.5±0.05	44.1±0.08	277±0.01	0.9±0.01
ноябрь	0.236	0.53	0.30	8.41±0.09	22.66±0.08	273.2±0.04	1.82±0.04
апрель	0.232	0.55	0.32	8.71±0.07	17.1±0.07	275.2±0.06	1.75±0.06
				ε''_1	ε''_2	T_0	dT
август	0.38	0.72	0.34	-	-	-	-
ноябрь	0.236	0.53	0.30	3.18±0.24	10.0±0.2	272.8±0.2	1.6±0.2
апрель	0.232	0.55	0.32	3.16±0.2	6.6±0.2	274.5±0.3	1.46±0.3
				χ_1	χ_2	T_0	dT
август	0.384	0.72	0.34	0.67±0.004	0.445±0.004	276.5±0.1	1.02±0.06
ноябрь	0.236	0.53	0.30	0.74±0.004	0.55±0.002	272.2±0.1	1.78±0.08
апрель	0.232	0.55	0.32	0.74±0.002	0.608±0.002	274.3±0.1	1.75±0.09

Таблица 1.6. Численные значения коэффициентов в выражениях (1.41) – (1.45) для карликовой ивы

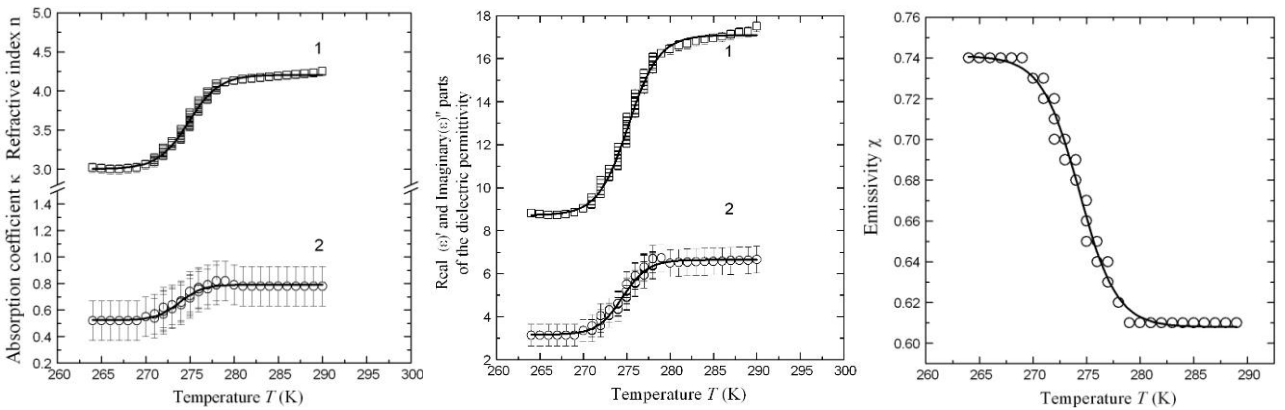
	W	ρ_p	ρ_s	n_1	n_2	T_0	dT
апрель	0.4	0.71	0.31	4.22±0.02	8.77±0.02	273.4±0.2	1.364±0.02
ноябрь	0.16	0.47	0.31	4.22±0.02	8.77±0.02	273.4±0.2	1.364±0.02
август	0.08	0.37	0.29	2.26±0.004	2.78±0.04	275±0.8	3.37±0.9
				κ_1	κ_2	T_0	dT
апрель	0.4	0.71	0.31	1.315±0.05	0.72±0.04	273.7±0.3	-1.14±0.29
ноябрь	0.16	0.47	0.31	0.47±0.05	0.77±0.05	274.9±0.9	1.3±0.8
август	0.08	0.37	0.29	$\kappa = -2.15 + 0.00968 \cdot T, \sigma = 0.12, R = 0.97$			
				ε'_1	ε'_2	T_0	dT
апрель	0.4	0.71	0.31	17.24±0.09	75.1±0.2	273.9±0.1	1.33±0.09
ноябрь	0.16	0.47	0.31	7.34±0.08	14.76±0.08	275±0.1	1.83±0.07
август	0.08	0.37	0.29	4.94±0.09	7.3±0.1	275.6±0.4	3.2±0.5
				ε''_1	ε''_2	T_0	dT
апрель	0.4	0.71	0.31	23.6±0.4	6.16±0.2	273.9±0.1	-1.22±0.09
ноябрь	0.16	0.47	0.31	2.6±0.2	6±0.2	275.2±0.3	1.44±0.3
август	0.08	0.37	0.29	3.94±1.3	1.72±0.7	278.3±5	-6±0.6
				χ_1	χ_2	T_0	dT
апрель	0.4	0.71	0.31	0.609±0.005	0.358±0.003	272.8±0.08	1.365±0.07
ноябрь	0.16	0.47	0.31	0.77±0.002	0.632±0.002	274.5±0.1	1.8±0.09
август	0.08	0.37	0.29	0.837±0.004	0.754±0.004	275.6±0.5	3.9±0.6



Август: $W_V = 0.38$, $\rho_p = 0.72$, $\rho_s = 0.34$

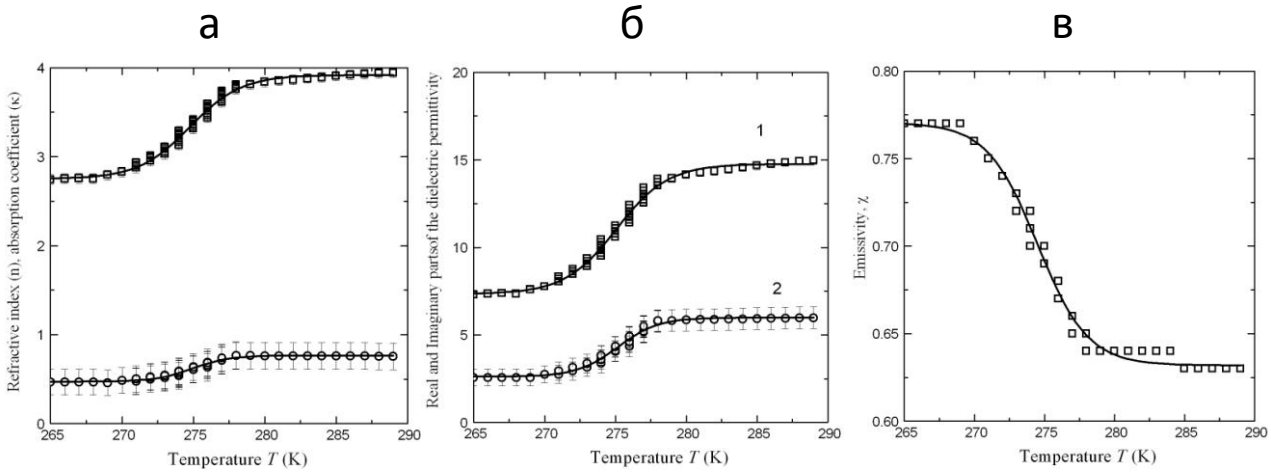


Ноябрь: $W_V = 0.24$, $\rho_p = 0.53$, $\rho_s = 0.30$

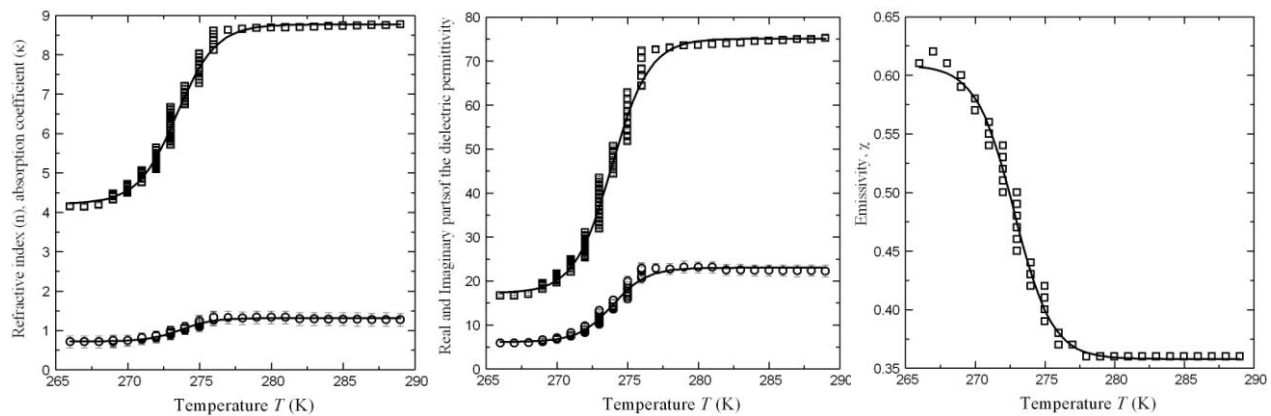


Апрель: $W_V = 0.23$, $\rho_p = 0.55$, $\rho_s = 0.32$

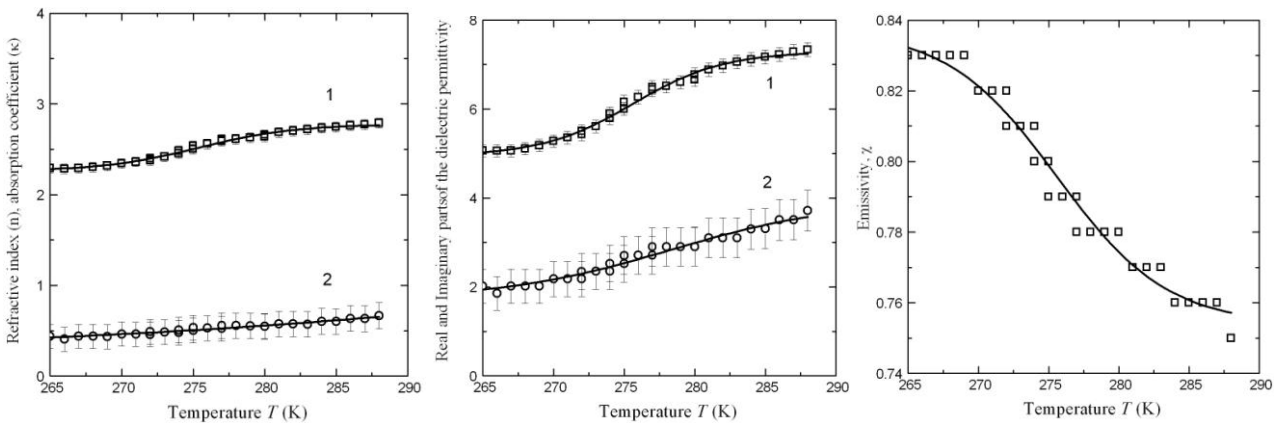
Рис. 1.8. Зависимости показателей преломления и поглощения (а), действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости (б), коэффициента излучения (в) на частоте 1.41 ГГц от температуры для карликовой березки



Ноябрь



Апрель



Август

Рис. 1.9. Зависимости показателей преломления и поглощения (а), действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости (б), коэффициента излучения (в) на частоте 1.41 ГГц от температуры для карликовой ивы

1.4. Модель комплексной диэлектрической проницаемости тундровой растительности и почвы

Комплексная диэлектрическая проницаемость растительности может быть рассчитана на основе теории многокомпонентных смесей, учитывающих относительный объем компонент, их диэлектрические параметры, форму элементов включений. Используем для этого рефракционную модель [Birchak, 1974], которая для сухой растительности, состоящей из обезвоженного растительного вещества и воздуха, может быть записана в следующем виде

$$\sqrt{\varepsilon_{\text{сух}}} = 1 + V_{\text{сух}} (\sqrt{\varepsilon_V} - 1), \quad (1.46)$$

где $\varepsilon_{\text{сух}}$, ε_V , – КДП сухой растительности при $W=0$ и сухого растения (без воздуха), $V_{\text{сух}} = \rho_{\text{сух}} / \rho_V$ – объем сухой растительности, $\rho_{\text{сух}}$, ρ_V – плотности сухой растительности с воздушными включениями и растительности без воздушных включений.

Преобразуем выражение (1.46) к следующему виду:

$$\sqrt{\varepsilon_V} = 1 + \frac{\rho_V}{\rho_{\text{сух}}} (\sqrt{\varepsilon_{\text{сух}}} - 1) \quad (1.47)$$

Полученное выражение позволяет рассчитать КДП обезвоженной растительности (например, с использованием полученных эмпирических зависимостей (1.32), (1.33) и может быть использовано в дальнейшем при моделировании диэлектрических характеристик влажной растительности.

Из линейности графиков зависимостей $n(W)$, $\kappa(W)$ и отсутствия на них изломов, означающих изменение поведения диэлектрических свойств вещества за счет появления в образце новой компоненты с отличающимися диэлектрически-

ми параметрами, следует, что вода в растительном образце одинакова по диэлектрическим характеристикам. Подобное утверждение относится к исследованным видам травяной и моховой растительности, возможно, для некоторых видов тундровой растительности и для древесной растительности карликовых видов для подобного утверждения необходимо провести более детальные экспериментальные исследования. В то же время, известно, что вода в растении может находиться в связанном состоянии в клеточной мембране, внутри растительной клетки в виде сока растений, содержащего растворенные минеральные и органические вещества, а также в сокопроводящих каналах растения. Помимо этого в слое травяной растительности существует вода, не связанная непосредственно с растением, а находящаяся вне растения, но при этом взаимодействующая с поверхностью растения сорбционными силами, а также свободная вода (например, дождевые капли на листьях, поверхности почвы).

В летний период диэлектрические и радиоизлучательные характеристики тундровой растительности зависят от количества воды, находящейся вне растения (в виде капельной и пленочной воды на стеблях и листьях растений, свободной и связанной воды в поровом пространстве перегноя). Значительную часть теплого сезона тундра находится в состоянии переувлажнения. Суммарная толщина слоя тундровой растительности, состоящей из надземной (листья, стебли) и подземной (перегной, корневая система) частей, зависит от типа растительности и варьирует от долей сантиметра до нескольких метров (торфяники).

При переувлажнении подстилающей поверхности тундры в период сезонного оттаивания толщина скин-слоя тундровой растительности в сантиметровом диапазоне составляет доли сантиметра, а в дециметровом диапазоне не превышает нескольких сантиметров. Соответственно с этим, характеристики микроволнового излучения подстилающей поверхности тундры, формирующегося в растительном слое, могут быть рассчитаны по формулам (1.12), (1.14) для разных углов зондирования на вертикальной и горизонтальной поляризациях.

При отрицательной температуре вода, находящаяся вне растения, замерзает, переходя в лед. Вода внутри растения (вода в клеточной мембране, сок растения с растворенными веществами) также может замерзнуть, но при температуре ниже 0°C (по крайней мере, для некоторых видов тундровой растительности, например, для сфагнома). При ее замерзании образуется лед, характеризующийся слабым поглощением (например, на частоте 1.11 ГГц для воды $\varepsilon' = 78$, $\varepsilon'' \approx 5.2$, для льда $\varepsilon' = 3.17$, $\varepsilon'' \approx 0.001$). Таким образом, диэлектрические и радиоизлучательные свойства мерзлой почвы будут зависеть от объемной доли связанной воды, которая, в свою очередь, зависит от гранулометрического состава и температуры почвы. При известном гранулометрическом составе и температуре мерзлой почвы ее радиояркостьная температура может быть рассчитана с высокой точностью. Тундровая растительность, лежащая на поверхности мерзлой почвы, будет в этом случае выступать в качестве экранирующего слоя, а радиояркостьная температура будет зависеть от радиоизлучательных характеристик мерзлой почвы и растительного покрова.

Соответственно с вышесказанным, рефракционная формула для разных интервалов температур может быть записана в следующем виде:

1. $t > 0^\circ\text{C}$:

$$\sqrt{\varepsilon} = \begin{cases} 1 + \frac{\rho_{\text{СУХ}}}{\rho_V} (\sqrt{\varepsilon_V} - 1) + (\sqrt{\varepsilon_{\text{СВЯЗ}}} - 1) \cdot W, W \leq W_t, \\ 1 + \frac{\rho_{\text{СУХ}}}{\rho_V} (\sqrt{\varepsilon_V} - 1) + (\sqrt{\varepsilon_{\text{СВЯЗ}}} - 1) \cdot W_t + (\sqrt{\varepsilon_{\text{СВОБ}}} - 1) \cdot (W - W_t), W \geq W_t, \end{cases} \quad (1.48)$$

2. $t < 0^\circ\text{C}$:

$$\sqrt{\varepsilon} = \begin{cases} 1 + \frac{\rho_{\text{СУХ}}}{\rho_V} (\sqrt{\varepsilon_V} - 1) + (\sqrt{\varepsilon_{\text{СВЯЗ}}} - 1) \cdot W, W \leq W_t, \\ 1 + \frac{\rho_{\text{СУХ}}}{\rho_V} (\sqrt{\varepsilon_V} - 1) + (\sqrt{\varepsilon_{\text{СВЯЗ}}} - 1) \cdot W_t + (\sqrt{\varepsilon_{\text{ЛЕД}}} - 1) \cdot (W - W_t), W \geq W_t, \end{cases} \quad (1.49)$$

где W и W_t – объемные содержания связанной и свободной влаги в растении.

Из результатов лабораторных измерений диэлектрических характеристик тундровой растительности в интервале положительных температур следует, что диэлектрические и радиоизлучательные характеристики травяной и моховой растительности (ягель, злаки, мхи) могут быть описаны одной обобщенной зависимостью $\chi(W)$ (при некоторой потере точности) в пределах изменения значений объемной влажности от 0 до $0.80 \text{ см}^3/\text{см}^3$.

Микроволновое излучение подстилающей поверхности без растительности формируется почвенным покровом, конкретно мерзлой или сезонно-талой почвой. Для оттаявшей почвы, находящейся при положительной температуре и рассматриваемой как четырехкомпонентная система, состоящая

из воздуха, твердых почвенных частиц, связанной и свободной воды, рефракционная модель, имеет вид:

$$\sqrt{\varepsilon} = \begin{cases} \sqrt{\varepsilon_0} + (\sqrt{\varepsilon_{СВЯЗ}} - 1) \cdot W, & W \leq W_t, \\ \sqrt{\varepsilon_0} + (\sqrt{\varepsilon_{СВЯЗ}} - 1) \cdot W_t + (\sqrt{\varepsilon_{СВОБ}} - 1) \cdot (W - W_t), & W \geq W_t, \end{cases} \quad (1.50)$$

где ε , ε_0 , $\varepsilon_{СВЯЗ}$ и $\varepsilon_{СВОБ}$ – КДП влажной почвы, сухой почвы, связанной и свободной влаги соответственно, W и W_t – объемные содержания связанной и свободной воды в почве.

Для ε_0 справедливо следующее выражение:

$$\sqrt{\varepsilon_0} = 1 + V_M (\sqrt{\varepsilon_M} - 1), \quad (1.51)$$

где ε_M и $V_M = \rho / \rho_M$ – КДП и объем твердой минеральной части сухой почвы; ρ и ρ_M – плотности сухой почвы и минерала.

Для мерзлой почвы рефракционная формула примет вид

$$\sqrt{\varepsilon} = \begin{cases} \sqrt{\varepsilon_0} + (\sqrt{\varepsilon_{НЗ}} - 1) \cdot W, & W \leq W_t, \\ \sqrt{\varepsilon_0} + (\sqrt{\varepsilon_{НЗ}} - 1) \cdot W_t + (\sqrt{\varepsilon_{ЛЕД}} - 1) \cdot (W - W_t), & W \geq W_t, \end{cases} \quad (1.52)$$

где $\varepsilon_{ЛЕД}$ и $\varepsilon_{НЗ}$ – КДП льда и незамерзшей воды в мерзлой почве.

Комплексное использование данных дистанционного зондирования в видимом и инфракрасном позволяет классифицировать подстилающую поверхность (водная поверхность, лесные массивы, почва без растительности и с растительностью, определять различные характеристики тундровой растительности: видовой состав (древесная, травяная растительность) (видимый диапазон), тепловой режим (инфракрасный диапазон), влажность и биомассу. Различие радиоизлучательных характеристик живой и отмершей растительности в микроволновом диапазоне может быть исполь-

зовано для разработки методов дистанционной диагностики растительного покрова тундры.

Различение и выделение участков, занятых растительным покровом, возможно с использованием данных дистанционного зондирования в видимом диапазоне с разрешением до единиц метров. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности (при развитой растительности – температуры поверхностного слоя растительности) возможно с использованием дистанционных данных в инфракрасном диапазоне. При дистанционном микроволновом зондировании подстилающей поверхности с летательного аппарата (квадрокоптера, малой авиации, высотного самолета, спутника) пространственное разрешение составляет, в зависимости от высоты полета, от нескольких метров (квадрокоптер), десятков и сотен метров (вертолет, самолет) до нескольких километров (спутник). В частности при космическом микроволновом зондировании со спутника SMOS измеряемые радиояркие температуры подстилающей поверхности сопоставляются с геодезической ячейкой, линейные размеры которой составляет 16 км.

При пространственном разрешении, меньшем площади участка, занятого растительностью, радиоизлучательные характеристики будут зависеть от свойств растительности. При пространственном разрешении, превышающем площадь участка, занятого растительностью, дополнительная информация видимого диапазона (фотоплан, карта-схема) позволяет выделить участки без растительности и с растительностью, попадающие в пиксель микроволнового радиометрического приемника. Использование априорной информации о зави-

симостях коэффициентов излучения мерзлой и талой почв, растительности, позволяет рассчитать радиоизлучательные характеристики отдельных участков (при малой площади участка, погрешность оценки его радиоизлучательных характеристик может быть высокой).

В этом случае радиояркая температура подстилающей поверхности, формирующей микроволновое излучение, принимаемое антенной радиометрического приемника, может быть рассчитана по формуле:

$$T_B = \sum_{j=1}^n T_B^j S_j, \quad (1.53)$$

где T_B^j – радиояркие температуры входящих в геодезическую ячейку участков подстилающей поверхности с различными радиоизлучательными характеристиками, S_j – площади этих участков. Вклад T_B^i каждого из участков в формируемое подстилающей поверхностью излучение T_B при известном вкладе T_B^j всех других отдельных участков, входящих в геодезическую ячейку, может быть вычислен по формуле:

$$T_B^i = \left(T_B - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n T_B^j S_j \right) / S_i \quad (1.54)$$

В свою очередь, радиояркая температура однородного участка подстилающей поверхности может быть определена по известной формуле (1.14) с привлечением приведённых в данной главе эмпирических зависимостей.

Использование ранее установленных зависимостей коэффициентов излучения от физических характеристик подстилающей поверхности (температуры и солёности воды, влаж-

ности и температуры мерзлой и сезонно-талой почвы, влажности и температуры древесной и травяной растительности) позволяет рассчитать коэффициенты излучения и радиояркие температуры геодезической ячейки и сравнить их с измеренными дистанционным способом. Различие измеренных радиоярких температур и восстановленных на основе лабораторных измерений, может быть связано с изменением площадей занятых растительностью, либо с изменением свойств растительности. В свою очередь, определение изменения площадей, занятых растительностью, может быть использовано для оценки степени деградации растительного покрова.

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТУНДРЫ

Космический мониторинг тундры осуществлялся на территории полуострова Гыданский (Ямало-Ненецкий автономный округ) и включал в себя обработку данных спутника SMOS, полевые измерения физических параметров подстилающей поверхности, лабораторные измерения диэлектрических характеристик образцов почвы и растительности, отобранных с тестовых участков. На основе анализа сезонных вариаций радиояркостных температур подстилающей поверхности, измеренных со спутника SMOS, для исследуемой территории за период с 2012 по 2016 годы выделены временные периоды с различным поведением радиоизлучательных характеристик почвенного покрова, связанные с сезонным оттаиванием вечной мерзлоты. По данным лабораторных измерений установлены зависимости коэффициентов излучения почв, воды, растительности, применяемые для валидации данных космического микроволнового зондирования.

Территория Гыданского полуострова площадью 160 000 км² исследована крайне слабо, что подтверждается немногочисленностью научных публикаций в российских и международных научных журналах. На полуострове разведаны значительные запасы нефти и газа, промышленное освоение которых может быть сопряжено с ухудшением экологической ситуации окружающей среды, деградацией вечной мерзлоты и тундровой растительности. Это предопределяет необходимость изучения экологического состояния окружающей среды до начала интенсивной нефтегазодобычи. В связи со значительной площадью полуострова, является це-

лесообразным проведение экологических исследований с использованием методов космического мониторинга.

Для возможности использования данных дистанционного зондирования необходимо изучить закономерности взаимодействия электромагнитных волн разных диапазонов с элементами растительности, водой, талой и мерзлой почвой [Шарков, 2014; Садовничий, 1992]. Калибровка и валидация спутниковых данных предполагают использование тестовых полигонов с известными излучательными характеристиками подстилающей поверхности. Совместное исследование радиоизлучательных характеристик почвенного покрова в оптическом и микроволновом диапазонах показало, что на результаты дистанционных измерений оказывают влияние минералогический состав почвы, текстура, влажность, засоленность. Совокупное влияние этих факторов ведет к значительным пространственно-временным вариациям радиоизлучательных свойств почв [Mulder, 2011]. Разработка дистанционных микроволновых методов зондирования подстилающей поверхности основана на использовании моделей комплексной диэлектрической проницаемости почвы [Parrens, 2014].

На основе совместного использования дистанционных и наземных наблюдений, разработана томографическая система, позволяющая представлять пространственно-временное распределение влажности почвы в почвенном слое глубиной до 15 см [Gravalos, 2013]. Радиояркостные температуры, измеренные на вертикальной и горизонтальной поляризациях на двух различных углах зондирования использовались для определения влажности почвы [Albergel, 2011]. Показано, что погрешность определения влажности в значительной мере

зависит от степени развития растительного покрова [Panciera, 2011]. Оценена возможность использования данных спутника SMOS для одновременного определения влажности почвы и свойств растительности [Peischl, 2014].

Несмотря на имеющиеся данные, полученные к настоящему времени, существующие алгоритмы дистанционной оценки параметров подстилающей поверхности не позволяют с приемлемой точностью восстанавливать по спутниковым измерениям характеристики вечномёрзлых почв и растительности. В данной работе приведены результаты исследований радиоизлучательных характеристик подстилающей поверхности вблизи озера Парисенто, а также представлен алгоритм оценки суммарной увлажненности подстилающей поверхности на основе обобщенной зависимости коэффициента излучения почвы и растительности от влажности.

2.1. Основные характеристики микроволнового излучения подстилающей поверхности

Основными характеристиками микроволнового излучения являются радиояркость температура T_B и коэффициент излучения χ , связанные между собой соотношением [Шарков, 2014]:

$$T_B = \chi \cdot T_{\text{Э}}. \quad (2.1)$$

Здесь χ – коэффициент излучения, $T_{\text{Э}}$ – эффективная температура в скин-слое почвы толщиной

$$L_{\text{Э}} = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt{|\varepsilon|} \operatorname{tg} \delta}, \quad (2.2)$$

где λ – длина волны; $|\varepsilon| = \varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$; $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ – тангенс угла потерь; ε' и ε'' – действительная и мнимая части КДП, определяемые по формулам (1.4), (1.5), (1.7). Коэффициент излучения χ подстилающей поверхности может быть рассчитан по формуле (1.12), а величина T_{\ominus} – по формуле:

$$T_{\ominus} = T_0 + \int_0^{\infty} \frac{dT}{dz} \exp \left[- \int_0^{\infty} \gamma(z') dz' \right] dz, \quad (2.3)$$

где T_0 – температура поверхности, определенная по спутниковым данным MODIS или контактнм способом; dT/dz – локальный градиент температуры, определенный по результатам наземных измерений; $\gamma(z)$ – погонный коэффициент поглощения по мощности, определяемый по формуле:

$$\gamma(z) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon' - \sin^2 \theta}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - \sin^2 \theta} \right)^2} - 1 \right].$$

2.2. Методика исследований

Методология проведенных исследований основывалась на комплексном подходе, включавшем в себя обработку спутниковых данных, полевые и лабораторные измерения.

Данные дистанционного зондирования

Для определения значений радиоярких температур подстилающей поверхности использовались данные спутника SMOS (продукт L1C) [Gutierrez, 2014b]. Измерения выполняются пассивным радиометром MIRAS на частоте 1.41 ГГц и калибруются в единицах радиоярких температур. Высота орбиты спутника составляет 763 км. Погрешность определе-

ния T_B изменяется от ± 3 К в центре до ± 6 К на краях полосы захвата, ширина которой 890 км. Съёмка исследуемой территории производится 2-3 раза в сутки в диапазоне углов зондирования от 0° до 55° на горизонтальной и вертикальной поляризации. Данные продукта L1C привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 [Sahr, 2003], Линейный размер ячейки сетки составляет ~ 16 км, площадь ячейки ~ 195 км². Снимки SMOS предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта ESA № 4747 «Remote mapping of Siberian saline soils». В исследовании использовались данные L1C SMOS, полученные при измерении восходящего излучения на горизонтальной поляризации под углом зондирования 42.5° с пространственным разрешением около 40 км. Спутниковая съёмка охватывала всю территорию Ямало-Ненецкого округа.

Дополнение данных микроволнового зондирования результатами спутниковой съёмки в оптическом и ИК диапазонах позволяет повысить информативность дистанционного мониторинга путем учета видового состава растительности, оценки площадей, занятых внутренними водоемами, открытыми участками почв, промышленными и гражданскими объектами.

На основе анализа спутниковых снимков Landsat, полученных из архива Геологической службы США (USGS) [<https://earthexplorer.usgs.gov>], осуществлялось планирование трасс экспедиционных маршрутов, определялись места отбора проб воды, почвы, растительности. Помимо этого спутниковые снимки использовались для качественной оценки степени деградации тундровой растительности.

Продукты SMOS

Принимаемый со спутника необработанный поток данных (Raw data) в формате CCSDS-пакетов содержит результаты измерений радиометра и данные телеметрии. После предварительной сортировки и добавления необходимой служебной информации данные предстают в виде продукта SMOS Level 0 [Relloso, 2010]. Для целей калибровки и валидации предназначена серия продуктов SMOS Level 1. Они формируются в результате обработки продукта предыдущего уровня процессором L1OP и доступны в формате Earth Explorer. Продукты L1A представляют собой сопровождаемые данными телеметрии откалиброванные в технических единицах изображения с отдельных элементарных приемников [Barbosa, 2014]. Продукты L1B представляют собой изображения, полученные в результате реконструкции измеренных величин, в виде Фурье-компонент яркостной температуры, где разделение поляризаций представлено в растре антенны [Gutierrez, 2014a].

Наиболее интересным с практической точки зрения является продукт L1C, который содержит измеренные на различных углах зондирования значения яркостных температур на верхней границе атмосферы. Данные имеют географическую привязку к дискретной геодезической сетке ISEA 4N9. Продукт представлен в виде двух отдельных наборов данных: для поверхности суши (L1CL) и для поверхности океана (L1CS). Продукты L1C доступны в формате Earth Explorer и NetCDF [Gutierrez, 2014b]. Для каждого продукта L1C формируется также обзорная версия, содержащая значения яркостных температур, интерполированные для угла наблюдения 42.5° .

Продукты серии SMOS Level 2 предназначены для исследовательских целей. Они генерируются процессором L2OP и доступны в форматах Earth Explorer и NetCDF. Продукт Level 2 soil moisture (L2SM) содержит восстановленную влажность почвы, оптическую толщину растительности и другие полученные в процессе обработки вспомогательные данные (температура, диэлектрическая проницаемость и параметры шероховатости поверхности, яркостная температура на верхней границе атмосферы и на поверхности суши), с соответствующими погрешностями. Продукт Level 2 ocean salinity (L2OS) содержит восстановленные несколькими способами значения солености морской поверхности (SSS), а также яркостную температуру на верхней границе атмосферы и на поверхности воды, с соответствующими погрешностями. Данные продуктов серии SMOS Level 2 также привязаны географически к сетке ISEA 4H9 [Sahr, 2003].

Геодезическая сетка ISEA 4H9

При выборе системы представления результатов измерений яркостной температуры подстилающей поверхности Европейское космическое агентство руководствовалось как целями самой миссии SMOS, так и особенностями измерительной аппаратуры: разрешающей способностью, размерами и шестиугольной формой зон видимости антенн. Из используемых дискретных сеток с равновеликими ячейками была выбрана икосаэдрическая сетка Шнайдера – Icosahedral Snyder Equal Area (ISEA) grid 4H9 [Sahr, 2003]. Икосаэдральная симметрия лучше всего подходит для представления сферы методом рекурсивного разбиения. Название 4H9 (гексагональная с апертурой 4 и разрешением 9) означает, что сетка по-

строена в результате 9 шагов рекурсивного разбиения исходного икосаэдра шестиугольниками (hexagon) при четырехкратном уменьшении площадей шестиугольников на каждом шаге. В результате такого разбиения сетка ISEA 4H9 состоит из 2 621 450 ячеек равной площади (194.57 км^2) с почти равномерными интервалами между ними (около 15 км). Большинство ячеек сетки являются шестиугольниками, 12 ячеек являются пятиугольниками.

Следует отличать размеры ячеек сетки от пространственного разрешения данных SMOS. Продукты SMOS строятся на основе результатов измерений пассивного микроволнового 2D-радиометра MIRAS, поперечная разрешающая способность которого составляет $\sim 35 \text{ км}$, а продольная – зависит от угла зондирования (например, для угла зондирования 42.5° она составляет $\sim 64 \text{ км}$). Таким образом, значение T_B для любой ячейки продукта L1C сформировано участком подстилающей поверхности площадью $\sim 1760 \text{ км}^2$. Сама же ячейка площадью $\sim 195 \text{ км}^2$ находится в центре этого участка.

Продукты MODIS

Пространственное распределение термодинамической температуры поверхности оценивалось по данным радиометров MODIS/Terra (продукт MOD11A1) и MODIS/Aqua (продукт MYD11A1), полученным из открытой базы LP DAAC [<https://lpdaac.usgs.gov>]. В этих продуктах представлены "дневные" и "ночные" значения температур поверхности с пространственным разрешением 1 км и заявленной погрешностью $\pm 1 \text{ К}$, а также указано время их измерения. Используемые для восстановления температур алгоритмы MODIS [Wan, 1999] основаны на результатах пассивного сканирова-

ния восходящего излучения с длиной волны 10-12 мкм, поэтому значения температур относятся к самым поверхностным слоям почв и водоемов.

В силу климатических особенностей исследуемой территории, большую часть времени она закрыта облаками, что делает невозможным проведение измерений характеристик поверхности в оптическом и инфракрасном диапазонах. По этой причине во временных рядах спутниковых данных о термодинамической температуре поверхности имеется множество пробелов. В зимний период данные практически отсутствуют или единичны. Тем не менее в большинстве случаев удастся хотя бы раз в месяц выполнить совместный анализ снимков SMOS и MODIS, чтобы вычислить диэлектрические характеристики и влажность подстилающей поверхности.

В большинстве случаев MIRAS и MODIS выполняют измерения одного и того же участка поверхности с разницей не более 2 часов. Пространственная разрешающая способность радиометра MIRAS составляет около 40 км, радиометров MODIS – 1 км. Для совместной обработки данных двух радиометров, их пространственное разрешение необходимо выровнять. Анализ данных MODIS для каждого из рассматриваемых тестовых участков показал, что в пределах территории, попадающей в поле зрения диаграммы направленности антенн радиометра MIRAS, вариации температуры подстилающей поверхности как правило не превышают 2 К (при заявленной погрешности 1 К). Это позволяет понижать разрешение продуктов MODIS до уровня продуктов SMOS путем пространственного усреднения.

Полевые и лабораторные измерения

В наземном эксперименте на тестовых участках проводились измерения температуры почвы с погрешностью ± 0.5 К в поверхностном слое 0-20 см. Эти данные использовались для калибровки и валидации спутниковых данных SMOS, расчета температуры эффективно-излучающего слоя. Во время исследований глубина сезонного оттаивания изменялась от 40 см (под слоем карликовой березы) до 160 см (на участках дефляции). Температура подстилающей поверхности изменялась в разное время суток от 15°C (ночью) до 30°C (днем) и различалась на $3-5^{\circ}\text{C}$ для водной поверхности, травы, голой почвы. Термостатно-весовым способом определялись объемные влажности почвы и растительности с погрешностью не более 3%.

Измерения диэлектрических параметров почв и растительности проводились на лабораторной установке, согласно методике, описанной в разделе 1.2. Данные лабораторных измерений использовались для построения эмпирических зависимостей $\chi(W)$ и $\chi(T)$. Радиояркостная температура отдельных участков подстилающей поверхности рассчитывалась по формуле (2.1).

2.3. Результаты экспериментальных исследований

На рисунке 2.1 приведены снимки, сделанные со спутника Landsat 1 и 15 июля 2016 года. Анализ снимков указывает на их различие, которое может быть связано с изменением увлажненности территории. В летний период 2016 года наблюдалась засуха, в результате которой сократилась площадь болот и затопленных территорий, произошло заметное обмеле-

ние реки Юрибей, усыхание тундровых озер. Возможно, что изменение водного режима тундры в результате уменьшения влажности поверхностного слоя способствовало угнетению тундровой растительности.

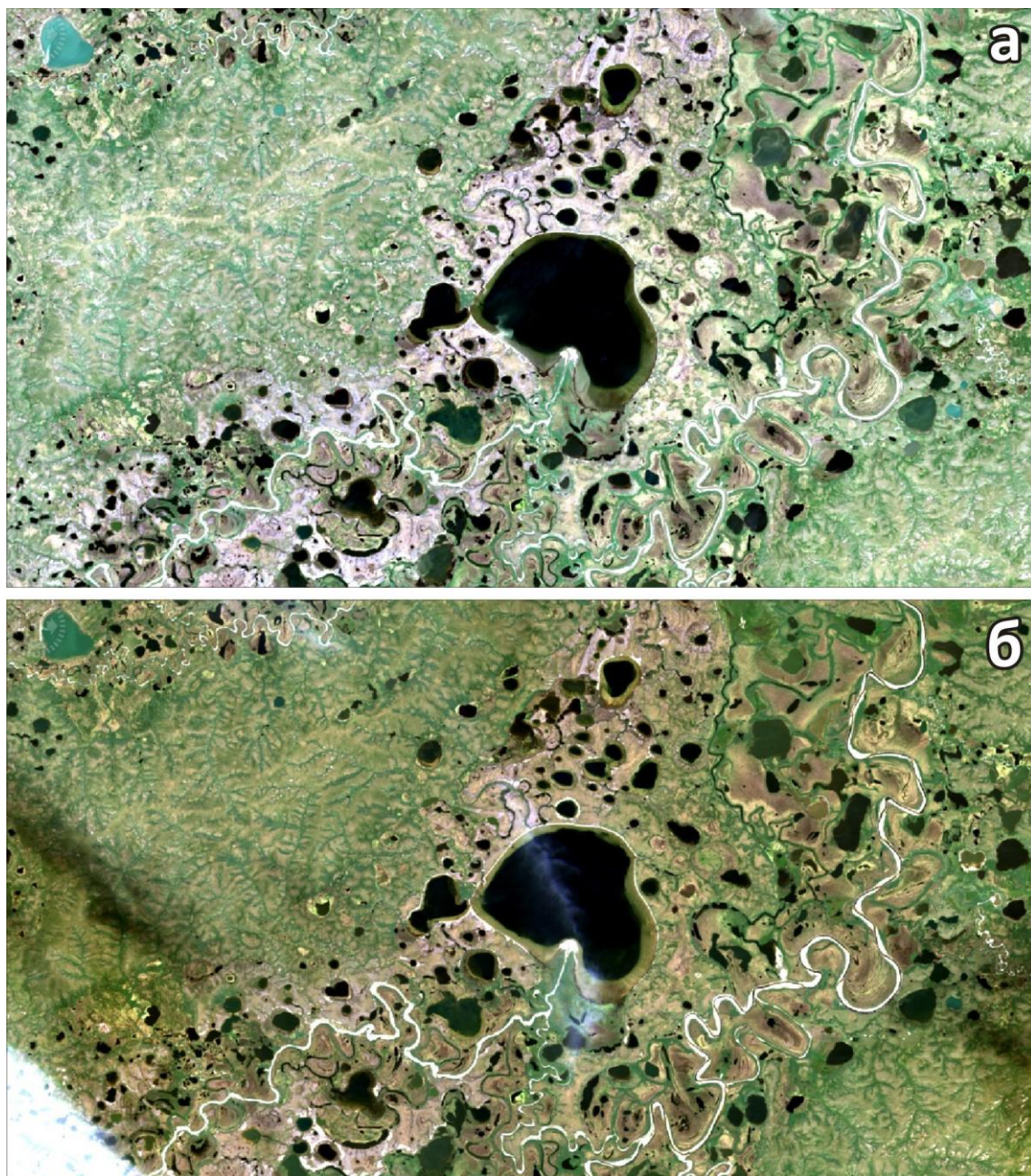


Рис. 2.1. Фрагменты снимков в оптическом диапазоне, полученных со спутника Landsat-8, по состоянию на 1 июля (а) и 15 июля (б) 2016 года

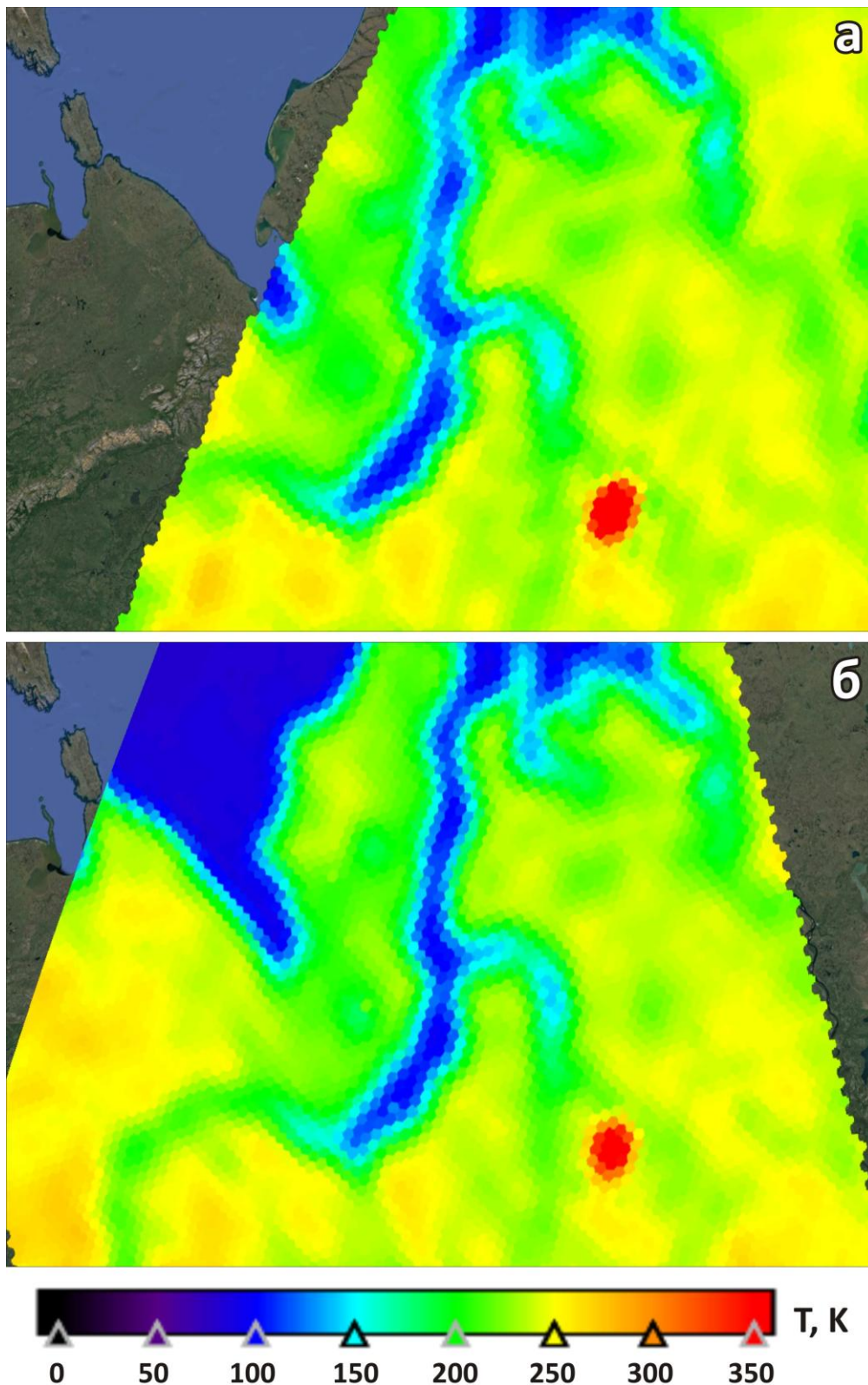


Рис. 2.2. Карта-схема пространственного распределения радиояркостных температур по данным спутника SMOS по состоянию на 8 августа 2016 года в 19:10 (а) и 9 августа 2016 года в 04:20 (б) по местному времени

На спутниковых снимках участки подстилающей поверхности, соответствующие разным типам ландшафтов, окрашены в различные псевдоцвета: русла рек – белый цвет; водная поверхность озер – черный цвет; высохшие озера, заболоченные участки поймы, тундровая растительность – зеленый цвет разных оттенков; участки со слабо развитым (возможно, частично деградированным) растительным покровом на водоразделах и возвышенностях – серый и коричневый цвета; участки с деградированным растительным покровом в результате дефляции (выдувы) – желтый цвет. По спутниковым снимкам может быть оценена суммарная площадь выдувов. Использование ретроспективных и современных данных позволяет установить тренды деградации растительного покрова тундры.

На рисунке 2.2 приведены карты-схемы пространственного распределения радиоярких температур, построенные по данным спутника SMOS. Спутниковые снимки сделаны во время нисходящего и восходящего пролетов: 8 августа 2016 года в 19:10 (а) и 9 августа 2016 года в 04:20 (б) по местному времени.

На рисунках 2.2 выделяется участок с высокой радиояркой температурой (тепловой остров), соответствующий населенному пункту. Также видно, что территории, прилегающие к Обской и Гыданской губам характеризуются пониженными значениями радиоярких температур. Это может быть связано с повышенной влажностью подстилающей поверхности по сравнению с удаленными от побережья территориями.

Микроволновое излучение подстилающей поверхности зависит от суммарного влияния почвы и слоя растительности. Для возможности разделения вкладов растительности и почвы необходимо знать зависимости коэффициентов излучения от температуры и объемной влажности для растительности и почвы. В том случае, когда толщина слоя растительности превышает толщину эффективно излучающего слоя, микроволновое излучение подстилающей поверхности будет зависеть от диэлектрических и радиоизлучательных свойств растительного покрова. В противном случае растительность будет играть роль ослабляющего слоя, экранируя микроволновое излучение почвы.

Для интерпретации данных дистанционного зондирования проводились измерения диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв, воды, растительности. На рисунках 2.3 и 2.4 приведены зависимости коэффициентов излучения почвы от температуры и объемной влажности.

Зависимость коэффициента излучения почвы от температуры (рис. 2.3) в диапазоне от 266 до 293 К аппроксимирована сигмоидальной функцией вида:

$$\chi = \frac{\chi_1 - \chi_2}{1 + \exp\left[\frac{T - T_0}{dT}\right]} + \chi_2 \quad (2.4)$$

где $\chi_1 = 0.66$, $\chi_2 = 0.47$ – начальное и конечное значения коэффициентов излучения; $T_0 = 277.7$ – средняя температура и $dT = 0.49$ – ширина фазового перехода; среднеквадратическая погрешность $\sigma = 0.006$.

В полученном выражении (2.4) величины χ_1 , χ_2 , T_0 , dT характеризуют радиоизлучательные свойства разных типов

подстилающей поверхности и могут быть измерены в лабораторных условиях. Значения χ и T могут быть определены контактным способом или по данным дистанционного зондирования в микроволновом и инфракрасном диапазонах.

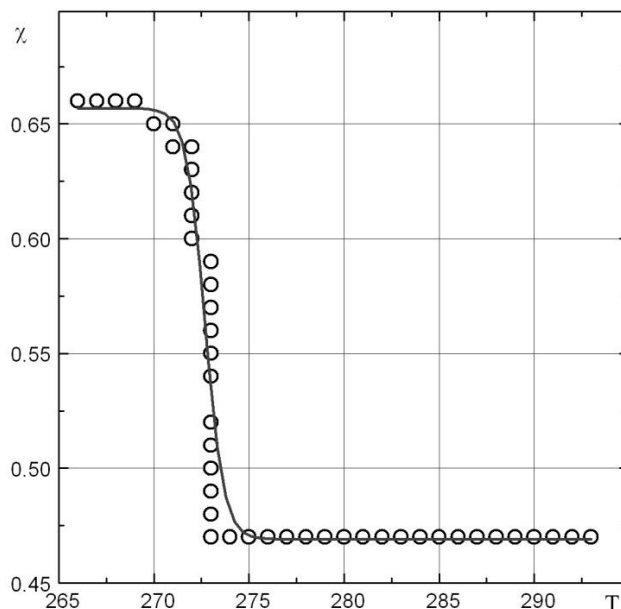


Рис. 2.3. Зависимости коэффициента излучения почвы от температуры

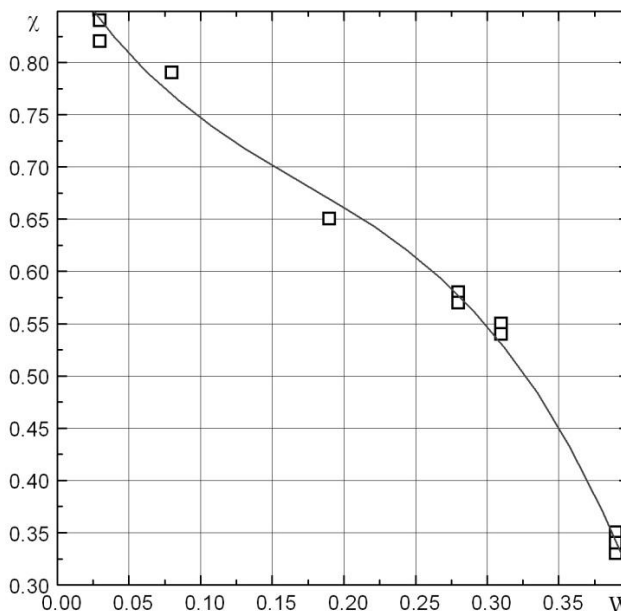


Рис. 2.4. Зависимости коэффициента излучения почвы от объемной влажности

Зависимость $\chi(W)$, представленная на рисунке 2.4, аппроксимирована полиномом третьей степени:

$$\chi(W) = 0.9 - 2.165 \cdot W + 8.06 \cdot W^2 - 15.8 \cdot W^3, \quad \sigma = 0.016 .$$

Обратная зависимость $W(\chi)$, наиболее удачно аппроксимируемая полиномом второй степени:

$$W(\chi) = 0.37 + 0.38 \cdot \chi - 0.398 \cdot \chi^2, \quad \sigma = 0.014 ,$$

может быть использована для оценки объемной влажности почвы по данным микроволнового дистанционного зондирования на участках без растительного покрова.

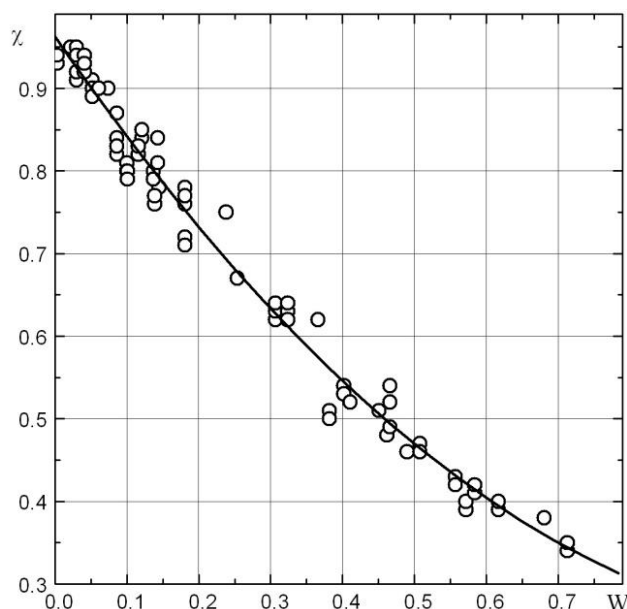


Рис. 2.5. Зависимость коэффициента излучения тундровой растительности от объемной влажности

Для оценки влияния тундровой растительности на микроволновое излучение подстилающей поверхности тундры исследовались диэлектрические характеристики отдельных видов растительности. Так как выделить вклад отдельных растений на суммарное излучение подстилающей поверхности не представляется возможным, на рисунке 2.5 приведена усредненная зависимость коэффициента излучения поверхно-

сти от объемной влажности растений (мох, лишайники, злаки, толокнянка, листья карликовой ивы и др.), аппроксимированная полиномом третьей степени:

$$\chi(W) = 0.96 - 0.963 \cdot W - 1.26 \cdot W^2 + 0.556 \cdot W^3, \sigma = 0.026$$

Обратная зависимость $W(\chi)$, имеет вид:

$$W(\chi) = 1.327 - 2.1 \cdot \chi - 0.78 \cdot \chi^2, \sigma = 0.03$$

Для расчета объемной влажности, запасенной как в почве, так и в слое растительности, была рассчитана обобщенная зависимость $W(\chi)$, имеющая вид (рис. 2.6):

$$W(\chi) = 1.41 - 2.45 \cdot \chi + 1.044 \cdot \chi^2, \sigma = 0.037 \quad (2.5)$$

С использованием формул (1.12), (1.14) и соотношения (2.5) значения радиоярких температур были пересчитаны в значения объемной влажности подстилающей поверхности. Температуры подстилающей поверхности рассчитывались по данным MODIS.

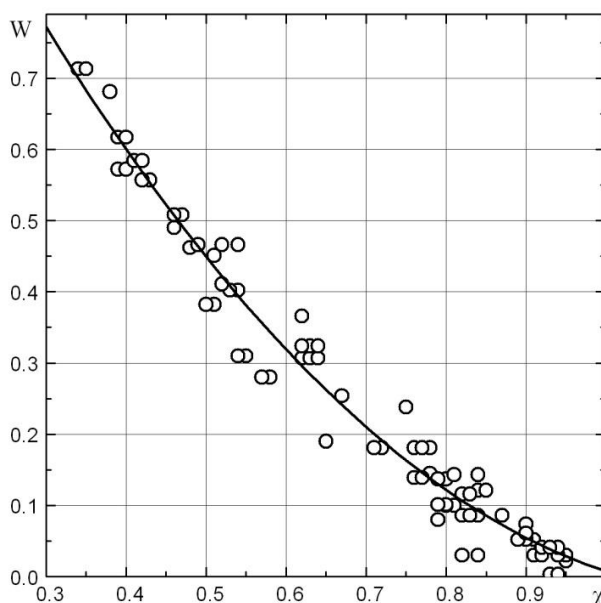


Рис. 2.6. Обобщенная зависимость объемной влажности от коэффициента излучения подстилающей поверхности тундры (почва, растительность)

Карта-схема влажности почвенного покрова Гыданского полуострова приведена на рисунке 2.7. На участках, соответствующих акваториям Обской и Тазовской губы (выделены синим цветом), влажность не определялась. Темные участки и полосы соответствуют пикселям, для которых данные MODIS отсутствуют, поэтому восстановление влажности невозможно. Повышенные значения влажности ($W = 0.34-0.40$) соответствуют береговым зонам. Центральные территории Гыданского полуострова характеризуются пониженными значениями объемной влажности, находящимися в пределах от 0.12 до 0.14.

Помимо определения увлажненности территории Гыданского полуострова является важной оценка временных вариаций радиояркостных температур, позволяющая качественно оценить изменения физических характеристик подстилающей поверхности. На рисунке 2.8 приведены зависимости, иллюстрирующие сезонные вариации радиояркостных температур, определенных со спутника SMOS в период с 2012 по 2016 годы, полученные для угла зондирования 42.5° . Из анализа спутниковых данных следует, что наблюдаются значительные сезонные вариации микроволнового излучения подстилающей поверхности, связанные с сезонным оттаиванием поверхностного слоя вечной мерзлоты, а также с изменением температуры окружающей среды.

В период отрицательных температур подстилающей поверхности радиояркостные температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях имеют численные значения $T_{BH} = 230 \div 250$ К и $T_{BV} = 250 \div 260$ К. Подобные значения характерны для сезонно-мерзлых почв и вечной мерзлоты.

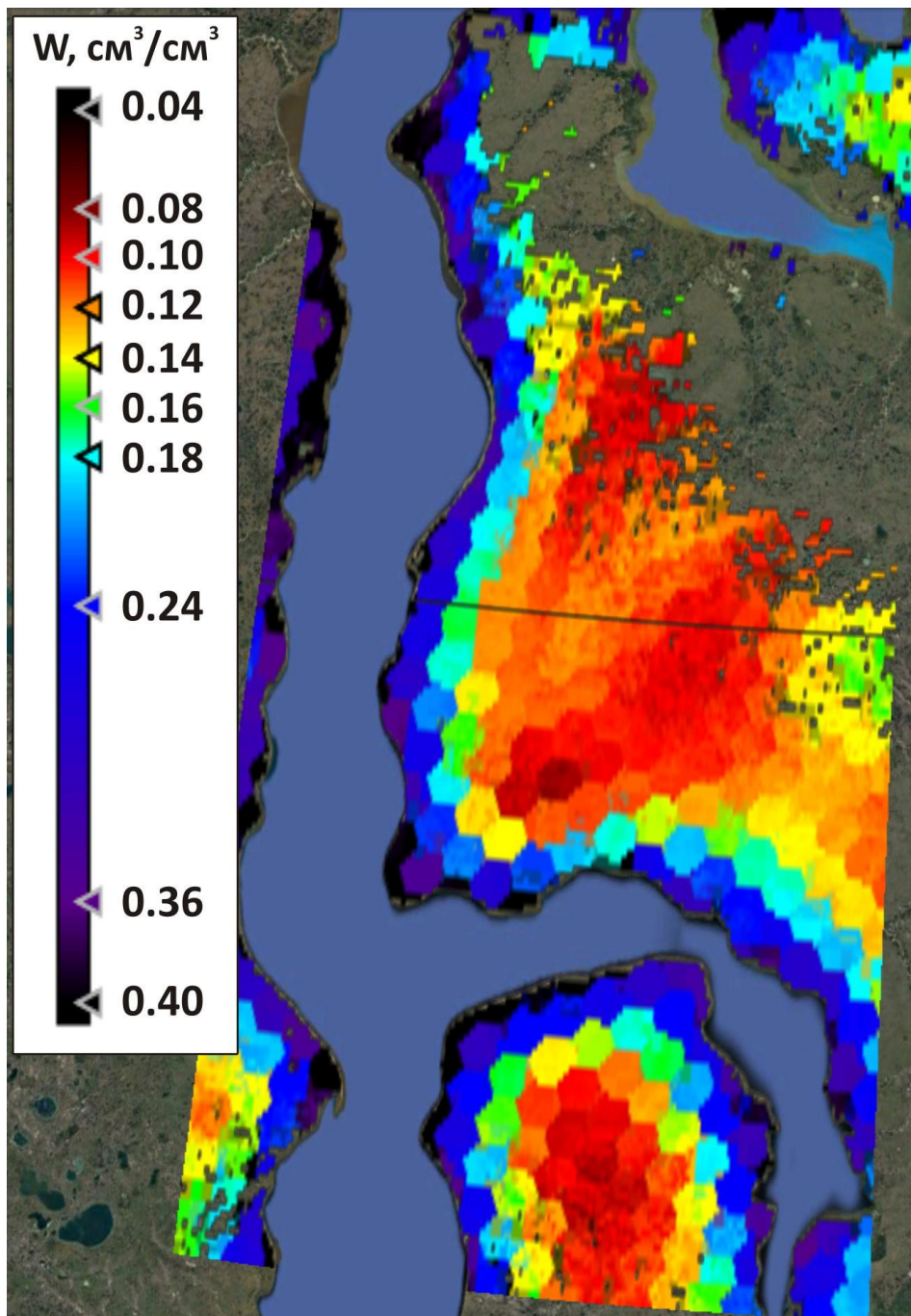


Рис. 2.7. Карта-схема пространственного распределения объемной влажности подстилающей поверхности Гыданского полуострова, построенная по данным продуктов L1C SMOS (19:10, 08.08.2016), MOD11A1 (20:12, 08.08.2016) и лабораторных измерений диэлектрических характеристик почв и растительности

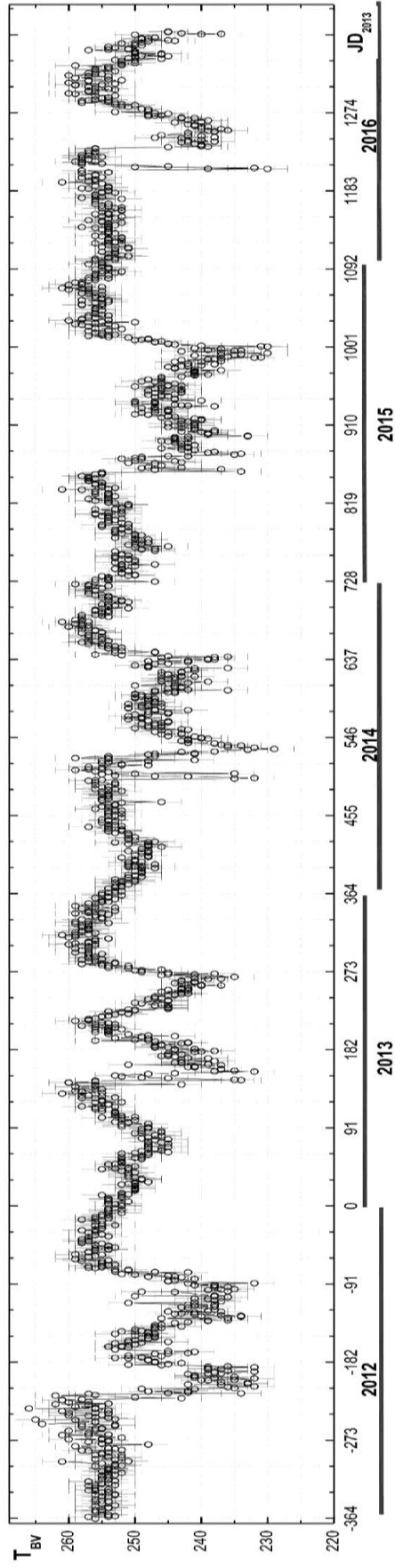
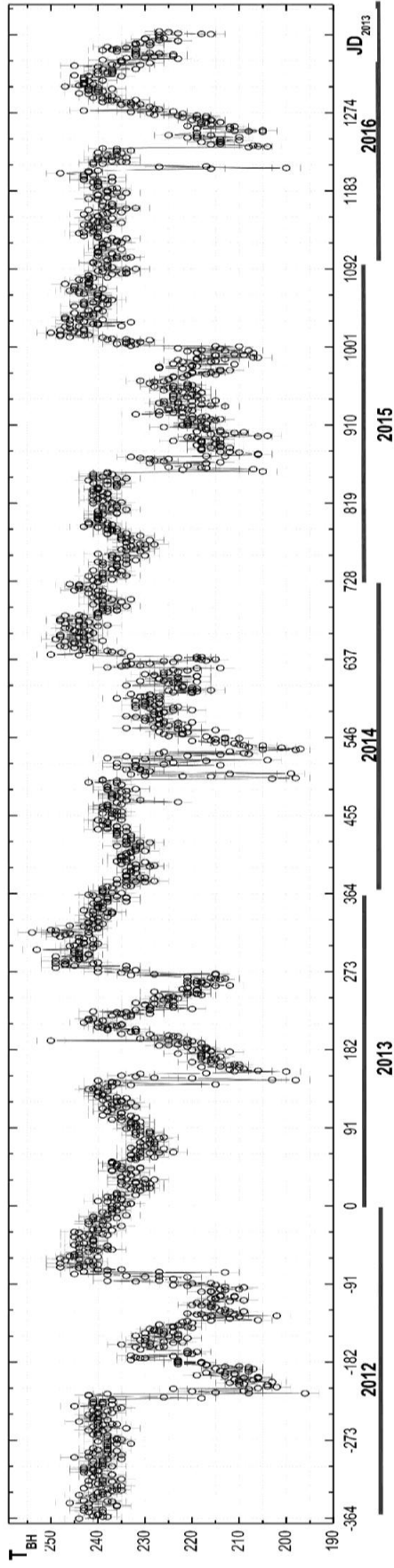


Рис. 2.8. Вариации радиояркостных температур подстилающей поверхности на вертикальной и горизонтальной поляризациях в период с 01.01.2012 (JD = -361) по 31.12.2016 (JD = 1461)

В холодный период отмечены случаи заметного понижения радиояркостных температур до значений $T_{BH} = 225$ К и $T_{BV} = 245$ К. Из данных Гидрометеоцентра следует, что подобные понижения T_B связаны с сильным похолоданием ($t < -40^\circ\text{C}$). В летний период наблюдается понижение радиояркостных температур до численных значений $T_{BH} = 205\div 235$ К и $T_{BV} = 225\div 255$ К. Такие значения радиояркостных температур для почв с талым верхним слоем. Из анализа сезонных вариаций радиояркостных температур возможно определение влажностных характеристик почвы, обнаружение таликов в вечной мерзлоте.

СВЯЗЬ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ РАДИОЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР АКВАТОРИИ КАРСКОГО МОРЯ С ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ В АРКТИКЕ

Потепление Арктики влечет за собой гидрологические и климатические изменения, которые проявляются в сокращении площадей ледового покрова, интенсивном таянии ледников и полярных шапок, уменьшении количества и суммарной площади термокарстовых озер, более раннем оттаивании и более позднем замерзании тундры [Karlsson, 2015]. Мониторинг гидролого-климатических изменений в гидрологических бассейнах Арктики показал, что наблюдаемые изменения связаны с изменением количества осадков и вариациями температуры [Bring, 2013], деградацией вечной мерзлоты [Harris, 2009; Koven, 2013], тундровой растительности, более сильным прогреванием почвенного покрова на участках дефляции, возрастанием скорости испарения и, как результат, поступлением в атмосферу дополнительных количеств водяного пара и метана, способствующих увеличению парникового эффекта [Bergamaschi, 2013]. На основе пятидесятилетних метеорологических наблюдений на островах Северного Ледовитого океана зафиксированы значительные климатические изменения, связанные с интенсивным потеплением. Начиная с 1960-х годов, наблюдалось повышение температуры воздуха, уменьшение количества твердых осадков, уменьшение массы ледников, уменьшение суммарной площади морских льдов в Сибирской Арктике [Копуа, 2014].

Детальное изучение современных гидролого-климатических изменений необходимо для возможности надежного прогнозирования возникающих опасных гидрологических и метеорологических явлений. Оперативная информация о гидрологических реакциях на климатические изменения в Арктическом регионе имеет решающее значение при планировании мероприятий по защите окружающей среды и адаптации общества к изменяющимся условиям жизнедеятельности и может быть получена на основе использования всепогодных микроволновых методов дистанционного зондирования [Poursanidis, 2017]. Для дистанционной оценки времени начала таяния и замерзания морского льда разработаны методы классификации арктических льдов с использованием радиометрических и радиолокационных изображений, полученных со спутников серии ОКЕАН-01 на частоте 37 ГГц на горизонтальной поляризации для окраинных морей Северного Ледовитого океана [Belchansky, 2004]. По данным дистанционного микроволнового зондирования с 1979 по 2002 годы в море Лаптевых выявлено уменьшение объемов и площадей морского льда на 1.5% и 1.7% в год [Bareiss, 2005], осуществлено сезонное прогнозирование годовой минимальной протяженности морского льда в морях Бофорта, Лаптевых, Чукотском, Восточно-Сибирском, Карском, Баренцевом и канадской Арктике [Drobot, 2007]. Спутниковые микроволновые измерения использовались для дистанционного обнаружения скоплений морского льда в полярных областях [Tikhonov, 2015].

Дистанционный микроволновый мониторинг континентальных вод и Мирового Океана основан на зависимостях ра-

диоизлучательных характеристик водной поверхности от температуры и солёности воды [Ballabrera-Poy, 2009; Talone, 2010; McCulloch, 2012; Wigneron, 2012]. По данным дистанционных измерений температуры и солёности поверхностного слоя Мирового океана рассчитана меридиональная океаническая циркуляция, оценены глобальные климатические изменения, происходящие в системе «океан-атмосфера» [Mulet, 2012].

Данные SMOS несут информацию о наводнениях, морских штормах, замерзании и таянии снежного и ледового покровов, оледенении, позволяют изучать динамику взаимодействия между океаном и атмосферой [Kerr, 2010]. В линейке продуктов SMOS имеются данные различного уровня обработки: L1C (радиояркие температуры подстилающей поверхности), L2OS (данные о солёности воды в океане), L3 (бинарные карты sea surface salinity SSS) [Brassington, 2009] и L4C (продукты, объединяющие данные SMOS с любым другим источником информации) [Hoareau, 2014]. Погрешности дистанционного определения sea surface salinity (SSS) по данным спутника SMOS могут возникать из-за морского волнения, образования пены, обрушения волн. Повышение точности дистанционной оценки SSS возможно при измерении радиоярких температур водной поверхности на разных углах зондирования [Yin, 2014], сравнении пространственных данных SSS с точными контактными измерениями с буев [Prakash, 2013], использовании априорных данных о состоянии поверхности океана [Umbert, 2014; Olmedo, 2016]. Совместное использование данных SMOS, MODIS, позволяет оценить пространственно-временные изменения SSS [Qing, 2013]. По-

грешность определения SSS на основе данных SMOS уровня L2OS не превышает 1 промилле [Talone, 2010].

Пространственное распределение солёности воды в Карском море рассчитывалось по данным продукта L2OS [Sabia, 2016]. Полученные значения солёности S варьируют в диапазоне от 0 до 40‰. Погрешность определения S составляет 0.3-1.5 ‰ при высоких значениях солёности ($> 20‰$), но при низких значениях солёности ($< 5‰$) – резко возрастает до 10 ‰ и выше. Для повышения точности дистанционного микроволнового зондирования проводятся лабораторные измерения диэлектрических характеристик снега, фирна и льда при разных значениях температуры, плотности и солёности [Geldsetzer, 2009].

3.1. Материалы и методика исследований

Объектом исследования являлась акватория Карского моря между о. Новая Земля и полуостровом Ямал (рис. 3.1). В летний период вода на поверхности моря прогревается от 2°C (на севере) до 6°C (в южной части). Зимой температура воды подо льдом близка к температуре замерзания (минус 1.8°C). Температура на поверхности льда может опускаться ниже -45°C. Толщина льда в разных районах Карского моря варьирует в пределах от 0.5 до 1.5 м. Солёность поверхностных вод меняется в пределах от 3-5‰ в южной части до 33-34‰ на севере. Уменьшение солёности морской воды происходит за счет речного стока, таяния льда и снега. Пространственное распределение опресненной воды по акватории моря различно в разные годы и часто изменяется даже в течение одного лета [Zhurbas, 2015; Polukhin, 2017]. Учитывая обозна-

ченные выше особенности в акватории Карского моря были выбраны шесть тестовых участков (рис. 3.1), находящихся на разном удалении от суши и устьев рек, и различающиеся по продолжительности существования и толщине ледового покрова, температуре и солености воды.

В зимний период большая часть исследуемой территории как правило закрыта облаками. Это является одной из причин того, что в базах космических данных оптического и инфракрасного диапазонов обнаруживается не более двух-трех информативных снимков в месяц. В таких условиях спутниковые данные микроволнового диапазона становятся, пожалуй, единственным источником ежедневной информации о характеристиках подстилающей поверхности на больших пространственных масштабах.

Данные пассивной спутниковой радиометрии принято выражать в единицах радиоярких температур. Радиояркая температура подстилающей поверхности определяется в соответствии с выражением (2.1) коэффициентом излучения и термодинамической температурой слоя, в котором формируется радиоизлучение. Для получения пространственных распределений и временных рядов значений радиояркой температуры подстилающей поверхности использовались данные SMOS (продукт L1C), подробно описанные во второй главе.

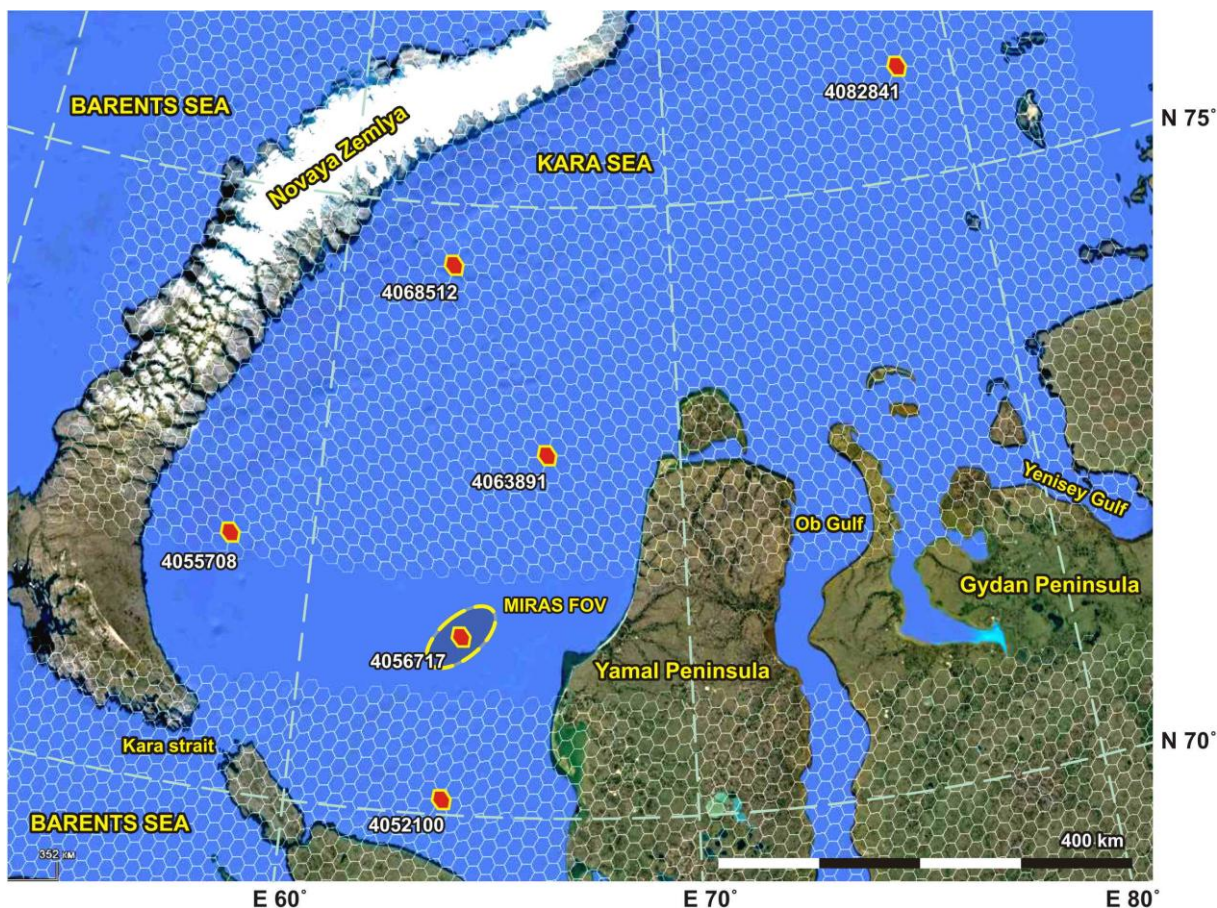


Рис. 3.1. Схематическая карта района исследования, геодезическая сетка ISEA, тестовые участки

3.2. Пространственное распределение радиоярких температур

На рисунке 3.2 приведены карты-схемы пространственного распределения радиоярких температур (T_{BH}), измеренных со спутника SMOS на горизонтальной поляризации под углом наблюдения 42.5° для акватории Карского моря в разные сезоны года. Видно, что значения T_{BH} разных участков акватории моря заметно различаются. На рисунке 3.2а (осенний период) значения $T_{BH} < 90$ К соответствуют участкам с открытой водой. Радиояркие контрасты между разными участками моря ($\Delta T_{BH} \approx 20$ К) связаны с вариациями темпера-

туры и солёности воды, а также с морским волнением, зависящим от скорости ветра. Обращают на себя внимание участки с пониженной радиояркостной температурой ($T_{BH} \approx 70\text{--}80\text{ K}$), которые могут соответствовать участкам с более высокой солёностью и/или более низкой температурой воды.

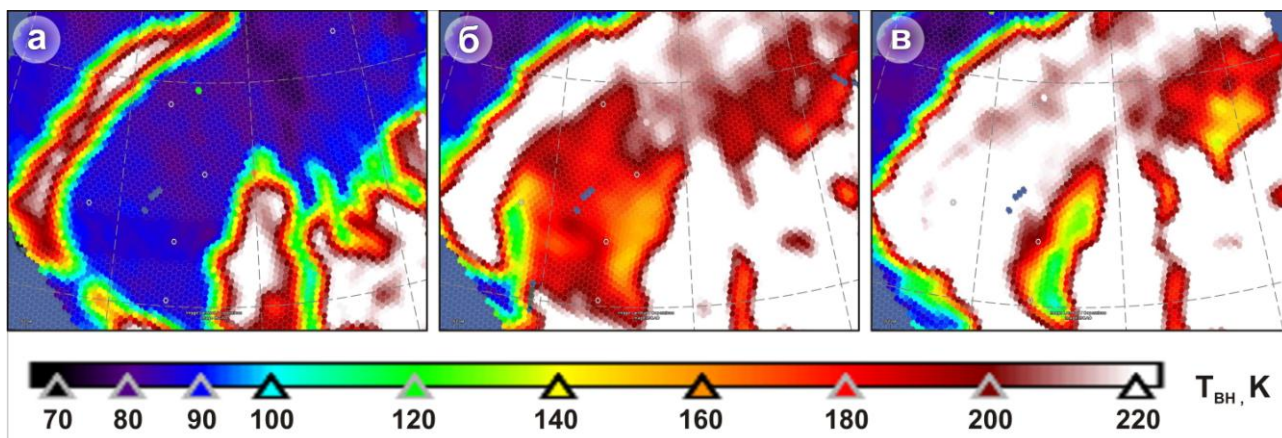


Рис. 3.2. Пространственное распределение радиояркостной температуры T_{BH} в разные периоды 2016-2017 г.: 29.09.2016 (а), 02.01.2017 (б), 18.05.2017 (в)

На рисунке 3.2б (зимний период) у восточного побережья Новой Земли виден участок с пониженной радиояркостной температурой $T_{BH} \approx 120\text{ K}$. Значения T_{BH} , промежуточные между радиояркостными температурами открытой воды и сплошного ледового покрова, указывают на одновременное существование в зимний период и открытой воды (разводий, полыньи) и льда. Существование полыньи может быть связано с притоком более теплой морской воды из незамерзающего Баренцева моря в Карское море.

В весенний период (рис. 3.2в) пространственное распределение T_{BH} , существенно изменилось по сравнению с зимним периодом. Наблюдаемое понижение радиояркостных температур связано с таянием и разрушением ледяного по-

крова, образованием на его поверхности снежиц, появлением больших по площади участков открытой воды ($T_{BH} = 100$ К).

Для участка подстилающей поверхности, представляющего собой свободную ото льда водную поверхность, значения T_{BH} варьируют в пределах от 75 до 95 К, в зависимости от интенсивности морского волнения (степени шероховатости подстилающей поверхности), термодинамической температуры и солёности воды. В пределах каждого отдельного участка наблюдавшиеся отклонения яркостной температуры от среднего за период открытой воды не превосходят 10%. При наличии установившегося ледяного покрова на поверхности воды, формируемое водной поверхностью радиоизлучение экранируется слоем льда. В этом случае радиоизлучение, исходящее от покрытого льдом участка поверхности моря, складывается из радиоизлучения самого ледяного слоя и радиоизлучения подледной воды. Поскольку коэффициент излучения соленого льда (0.75÷0.85) гораздо выше коэффициента излучения соленой воды (0.2÷0.3), основной вклад в суммарное излучение вносит ледовая компонента. Значение радиояркостной температуры для системы "лёд на воде" варьирует в зависимости от температуры, толщины и солёности льда, шероховатости поверхности (обусловленной условиями формирования льда), солёности морской воды под слоем льда изменяется в пределах от 210 до 240 К.

Сухой снежный покров радиопрозрачен в L-диапазоне, поэтому он практически не экранирует радиоизлучение системы "лёд на воде". Наличие мокрого снега на поверхности снежного покрова ведет к значительному изменению радио-

яркостной температуры подстилающей поверхности. Слой соленой воды толщиной 1-3 мм на поверхности льда будет почти полностью экранировать его радиоизлучение, и итоговое восходящее радиоизлучение в этом случае будет определяться в основном радиоизлучением верхнего водяного слоя.

В переходные периоды (замерзание и вскрытие) радиоизлучение акватории моря, попадающей в пиксель спутникового радиометра, формируется двумя типами подстилающей поверхности: открытой водой и системой "лёд на воде". Соответствующие значения радиояркостной температуры варьируют от значений, характерных для открытой воды (75÷95 К), до значений, характерных для системы "лёд на воде" (210÷240 К), – в зависимости от распределения долей площади этих участков в зоне охвата диаграммы направленности антенн радиометра MIRAS.

3.3. Годовая динамика радиояркостных температур

Сезонная и годовая динамика радиояркостных температур акватории Карского моря исследовалась на тестовых участках с 2012 по 2017 годы. Из приведенных на рисунке 3.3 зависимостей $T_{BH}(JD)$ видно для разных участков акватории и в разные годы динамика довольно разнообразна. Максимальные вариации радиояркостных температур T_{BH} достигают 150 К. На рисунке 3.3 величина JD представляет собой Юлианский день, отсчитываемый от даты 01.01.2012. Цифрами 1-4 обозначены даты, соответствующие началу качественных изменений характеристик микроволнового излучения морской акватории:

1. Начало периода открытой воды: JD_1 – дата, начиная с которой значения радиояркостной температуры T_{BH} не отличались более чем на 10% от характерных для "водного" периода значений T_{BH}^W в течение не менее чем 10 дней. То есть:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta T_{BH} = \left| \frac{T_{BH} - T_{BH}^W}{T_{BH}^W} \right| > 10\%, \quad \text{для } JD = JD_1 - 1 \\ \delta T_{BH} = \left| \frac{T_{BH} - T_{BH}^W}{T_{BH}^W} \right| \leq 10\%, \quad \forall JD \in [JD_1; JD_1 + 10] \end{array} \right.$$

2. Начало периода замерзания: JD_2 – дата, начиная с которой значения радиояркостной температуры отличались более чем на 10% от характерных для "водного" периода значений в течение не менее чем 30 дней.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta T_{BH} = \left| \frac{T_{BH} - T_{BH}^W}{T_{BH}^W} \right| \leq 10\%, \quad \text{для } JD = JD_2 - 1 \\ \delta T_{BH} = \left| \frac{T_{BH} - T_{BH}^W}{T_{BH}^W} \right| > 10\%, \quad \forall JD \in [JD_2; JD_2 + 30] \end{array} \right.$$

3. Начало периода установившегося ледового покрова: JD_3 – дата, начиная с которой значения температуры T_{BH} не отличались более чем на 10% от характерных для "ледового" периода значений T_{BH}^I в течение не менее чем 10 дней.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta T_{BH} = \left| \frac{T_{BH} - T_{BH}^I}{T_{BH}^I} \right| > 10\%, \quad \text{для } JD = JD_3 - 1 \\ \delta T_{BH} = \left| \frac{T_{BH} - T_{BH}^I}{T_{BH}^I} \right| \leq 10\%, \quad \forall JD \in [JD_3; JD_3 + 10] \end{array} \right.$$

4. Начало периода вскрытия: JD_4 – дата, начиная с которой значения радиояркостной температуры отличались более чем на 10% от характерных для "ледового" периода значений в течение не менее чем 30 дней.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta T_{BH} = \left| \frac{T_{BH} - T_{BH}^I}{T_{BH}^I} \right| \leq 10\%, \quad \text{для } JD = JD_4 - 1 \\ \delta T_{BH} = \left| \frac{T_{BH} - T_{BH}^I}{T_{BH}^I} \right| > 10\%, \quad \forall JD \in [JD_4; JD_4 + 30] \end{array} \right.$$

Определенные таким способом границы периодов открытой воды, замерзания, ледостава и вскрытия для выбранных участков Карского моря приведены в таблице 3.1. Там же представлены характерные для участков значения радиоярких температур в "водный" (T_{BH}^W) и "ледовый" (T_{BH}^I) периоды. Они рассчитаны на основе данных за весь период наблюдения.

Следует отметить наблюдавшиеся отклонения. Так, например, на участке 4052100 в 2012 и 2017 годах значения радиоярких температур не находились достаточно долго (10 дней) в диапазоне "ледовых" значений, что интерпретировано как отсутствие фазы ледостава. В отдельных случаях в феврале-апреле радиояркие температуры опускались до уровня "водных" значений и оставались в этом диапазоне более 10 дней, а затем возвращались в диапазон "ледовых" значений. Такие ситуации интерпретировались как смена фаз ледового покрова. Данные явления зарегистрированы на участке 4068512 в 2012 году и на участке 4055708 в 2017 году.

На участке 4082841 в июле 2013 года наблюдается отдельный максимум. Радиояркие температуры, ранее уже вышедшие на уровень "водных" значений, с 6 июля постепенно возрастают в течении 10 дней на 50 К, а затем также плавно уменьшаются до первоначальных значений к 26 июля. Вероятной причиной может являться прохождение через этот участок дрейфующих льдов и опреснение морской воды при их таянии.

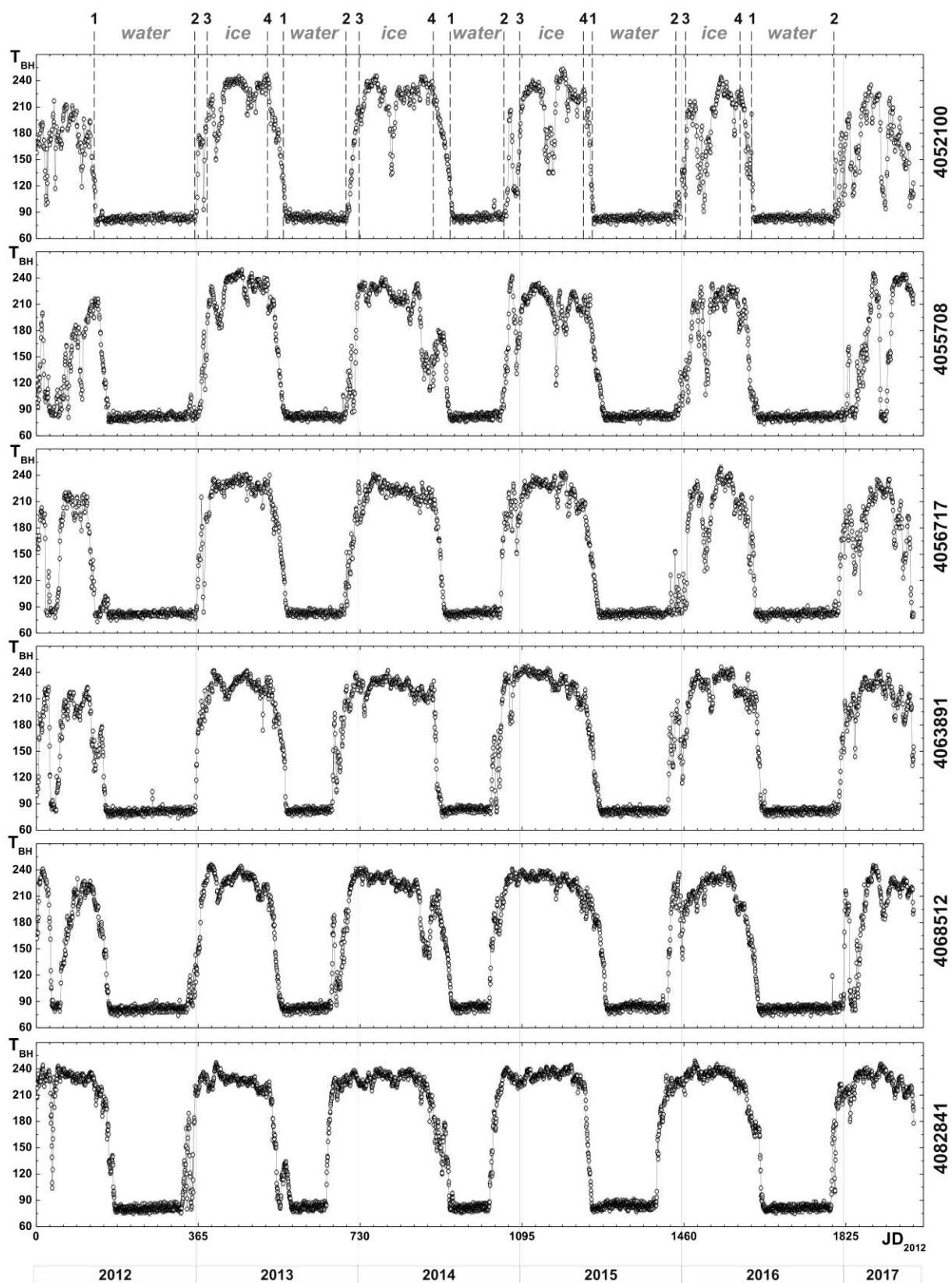


Рис. 3.3. Динамика радиоярких температур $T_{BH}(JD)$ для тестовых участков Карского моря по данным продукта L1C SMOS

На всех наблюдаемых участках процессы перехода от "ледовых" значений яркостной температуры к "водным" как правило, проходят достаточно монотонно, что дает возможность определить скорость вскрытия путем линейной аппроксимации зависимости $T_{BH}(JD)$ на соответствующем интервале. В случаях, когда линейная аппроксимация была неприменима, скорость вскрытия оценивалась исходя из пороговых значений и длительности переходного периода.

Определим фазы ледового режима на основе анализа временных рядов радиояркостной температуры (рис. 3.3).

Период открытой воды – временной интервал между JD_1 и JD_2 , характерный для температур, превышающих температуру замерзания соленой морской воды. Значения T_{BH} , изменяющиеся в пределах $70 \div 95K$, зависят от температуры, солености воды, интенсивности морского волнения и образующейся при этом пены [Anguelova, 2013]. Возрастание T_{BH} может быть связано с наличием дрейфующих льдов, опреснением морской воды при их таянии, морским волнением, зависящим от скорости приводного ветра, образованием пены.

Продолжительность периода открытой воды (ППОВ) является важным гидрологическим параметром, характеризующим происходящие гидролого-климатические изменения. Продолжительность периода вычислялась как разница дат JD между его окончанием и началом. Численные значения ППОВ для разных участков Карского моря приведены в таблице 3.2.

Период образования ледового покрова – временной интервал между JD_2 и JD_3 в течение которого на водной поверхности образуется ледовый покров толщиной $d \geq L_3$ дос-

таточной для того, чтобы экранировать микроволновое излучение водной поверхности. В этот период значения T_{BH} возрастают от 90 до 220К. Вариации T_{BH} связаны с появлением ледового покрова на водной поверхности, увеличением толщины слоя льда d , возникновением интерференционных явлений при изменении соотношения λ/d .

Из анализа приведенных на фиг. 3.3 зависимостей $T_{BH}(JD)$ следует, что переход от открытой воды до образования сплошного ледового покрова на разных участках Карского моря происходит в течение 20-40 суток. Из рисунка 3.3 видно, что в течение зимнего сезона 2016-2017 годов, сплошной ледовый покров на многих участках Карского моря не образовался. Вариации радиоярких температур достигали 150 К. В северной части Карского моря наблюдались вариации T_{BH} до 60 К. Из этого следует, что ледовый покров в течение зимы полностью или частично разрушался, например, в результате штормов и сильных ветров, особенно в период образования переходных форм морского льда (ниласа) при малой толщине ледового покрова.

Процессы перехода значений яркостной температуры от "водных" к "ледовым" часто сопровождаются последующим кратковременным возвращением в диапазон переходных (а иногда даже "водных") значений. Среди причин, нарушающих монотонность процесса можно назвать: разрушение недостаточно толстой ледяной корки сильным ветром, штормы, повышение температуры воздуха в зимний период, жидкие осадки, включая мокрый снег, поступление теплых вод из Баренцева моря. Перечисленные явления вносят неоднозначность в само понятие и определение скорости замерзания.

Поэтому при оценке скорости замерзания путем линейной аппроксимации зависимости $T_{BH}(JD)$, границы интервалов выбирались исходя из поведения яркостной температуры в каждом конкретном случае. В тех случаях, когда удавалось выделить несколько этапов замерзания, определялись скорости замерзания на каждом этапе.

Результаты определения (тем или иным способом) скоростей замерзания и вскрытия, а также средние значения яркостных температур в фазы ледостава и открытой воды представлены в таблице 3.3.

Период установившегося ледового покрова – временной интервал между JD_3 и JD_4 на зависимостях $T_{BH}(JD)$, характерен для отрицательных температур окружающей среды, при наличии на водной поверхности ледового покрова толщиной $d \geq L_{\odot}$. Значения T_{BH} , изменяющиеся в пределах 210÷230 К, зависят от температуры и солености льда, сплоченности ледяного покрова, наличия на его поверхности снежиц, талых прудов, возникающих во время оттепелей. Обращают на себя внимание случаи понижения T_{BH} на 30–50 К в зимний период. Причинами пониженных радиояркостных температур могут быть: 1) образование опресненного льда из опресненной воды, характеризующегося незначительным поглощением микроволнового излучения; 2) аномально низкие температуры (ниже -45°C), при которых солевой раствор, находящийся в микропорах морского льда, замерзает, диэлектрические потери в нем существенно уменьшаются, а толщина скин-слоя превышает толщину льда. В перечисленных случаях ледовый покров перестает полностью экранировать микроволновое излучение лежащей под ним воды. Комбинирование микро-

волновых измерений данными дистанционного зондирования в видимом и инфракрасном диапазонах (для оценки сплоченности льда и определения температуры поверхности, соответственно) позволяет разделить эти эффекты. Также одной из возможных причин понижения T_{BH} может быть появление протяженных участков открытой воды, в случае разрушения сплошного ледового покрова и появления разводий.

Продолжительность ледового периода (ПЛП), определяемая по датам, соответствующим изломам (точкам 3 и 4), характеризует гидролого-климатические изменения, происходящие в Арктике. Тренды длительности холодного периода указывают на направленность климатических изменений. На основе спутниковых данных установлено, что продолжительность ледового периода с 2014 по 2017 годы сокращается.

Период таяния ледового покрова – временной интервал между точками JD_4 и JD_1 является переходным от отрицательных температур к положительным. Значения T_{BH} понижаются с 210–230 до 85–90 К. Вариации T_{BH} обусловлены таянием ледового покрова, лежащего на его поверхности снега, образованием снежниц, участков открытой воды. Так как скин-слой для соленой воды на частоте 1.41 ГГц составляет доли сантиметра, то появление снежниц на поверхности ледяного покрова оказывает сильное экранирующее влияние на его микроволновое излучение. Наблюдаемые понижения T_{BH} могут быть связаны с изменением физических свойств однолетнего морского льда. Перед началом таяния однолетний морской лед на нижней границе, соприкасающейся с водой, покрывается микротрещинами, по которым вода поднимается вверх. Этот эффект приводит к понижению радио-

яркостной температуры до тех пор, пока вода в микротрещинах льда снова не замерзнет и радиояркостная температура не восстановится до прежнего значения [Wadhams, 1988]. Данные дистанционного зондирования морского льда, полученные в летний период 1979 года с помощью Scanning Multichannel Microwave Radiometer, позволили выявить в сезонных ледовых зонах Карского и Баренцева морей многослойность ледового покрова. Возникновение многослойной структуры, образующейся в весенний период в результате поверхностного таяния льда и последующего замерзания растаявшей воды, сопровождается резкими кратковременными изменениями радиоизлучательных характеристик акватории моря на разных частотах. Это позволяет осуществить раннюю идентификацию начала таяния и получить дополнительную информацию о состоянии ледового покрова [Anderson, 1985].

На рисунках 3.4 и 3.5 приведены тренды продолжительности ПОВ и ПЛП, соответственно. Из графиков видно, что за последние пять лет наблюдалось двукратное уменьшение продолжительности ПОВ в 2012-2013 гг., а затем почти такое же двукратное ее увеличение с 2013 по 2016 гг. Возможно, что подобное поведение трендов ПОВ указывает на циклические изменения, происходящие в Арктике. Похожее поведение наблюдается для трендов ПЛП. Из анализа данных SMOS следует, что в последние три года на всех участках Карского моря наблюдается почти двукратное увеличение продолжительности периода открытой воды, сопровождаемое соразмерным сокращением продолжительности периода ледостава.

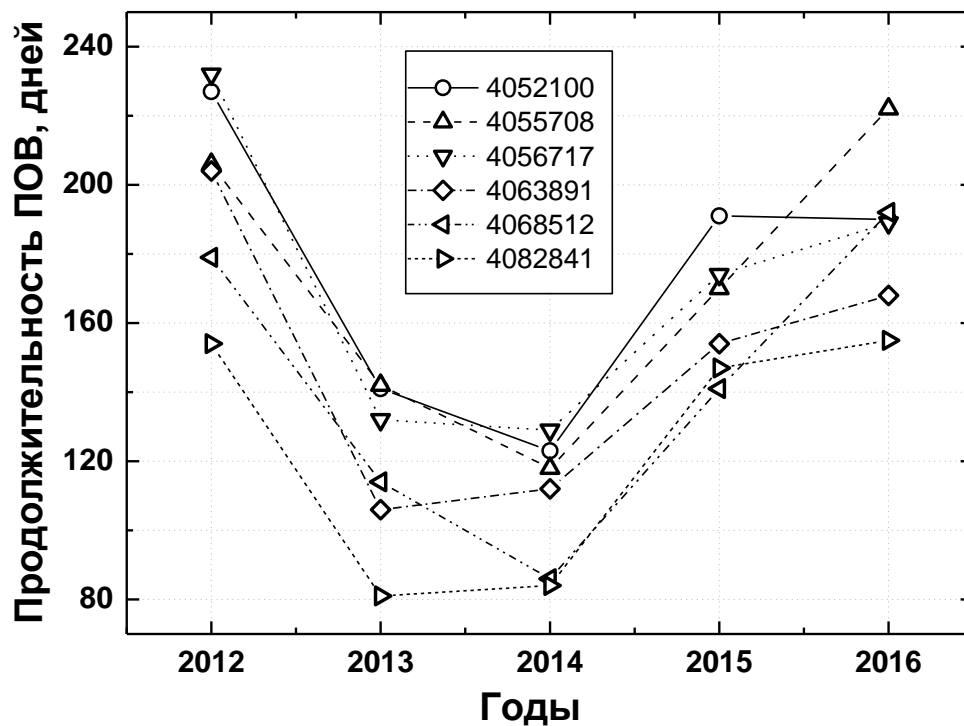


Fig. 3.4. Тренды продолжительности периода открытой воды

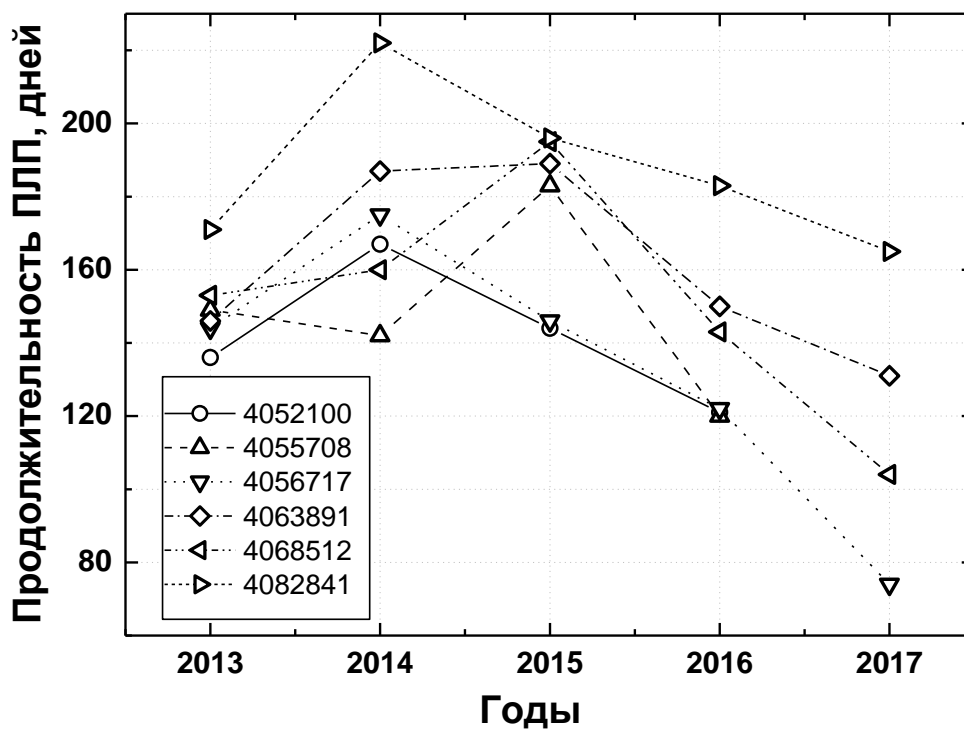


Fig. 3.5. Тренды продолжительности периода ледостава

Таблица 3.1. Границы фаз ледового режима для участков Карского моря

ID участка, температуры	Периоды вскрытия	Периоды открытой воды	Периоды замерзания	Периоды ледостава
4052100 $\overline{T_{BH}^W} = 84 \text{ K}$ $\overline{T_{BH}^I} = 215 \text{ K}$... – 14.05.12 12.06.13 – 14.07.13 22.06.14 – 25.07.14 24.05.15 – 10.06.15 13.05.16 – 04.06.16	15.05.12 – 28.12.12 15.07.13 – 03.12.13 26.07.14 – 25.11.14 11.06.15 – 17.12.15 05.06.16 – 11.12.16	29.12.12 – 25.01.13 04.12.13 – 05.01.14 26.11.14 – 31.12.14 18.12.15 – 12.01.16 12.12.16 – ...	26.01.13 – 11.06.13 06.01.14 – 21.06.14 01.01.15 – 23.05.15 13.01.16 – 12.05.16 —
4055708 $\overline{T_{BH}^W} = 82 \text{ K}$ $\overline{T_{BH}^I} = 220 \text{ K}$	20.05.12 – 10.06.12 21.06.13 – 10.07.13 14.05.14 – 18.07.14 03.06.15 – 02.07.15 20.05.16 – 14.06.16 15.03.17 – 17.03.17	11.06.12 – 03.01.13 11.07.13 – 29.11.13 19.07.14 – 14.11.14 03.07.15 – 20.12.15 15.06.16 – 21.01.17 18.03.17 – 31.03.17	04.01.13 – 22.01.13 30.11.13 – 22.12.13 15.11.14 – 01.12.14 21.12.15 – 19.01.16 22.01.17 – 24.02.17 01.04.17 – 11.04.17	23.01.13 – 20.06.13 23.12.13 – 13.05.14 02.12.14 – 02.06.15 20.01.16 – 19.05.16 25.02.17 – 14.03.17 12.04.17 – ...
4056717 $\overline{T_{BH}^W} = 83 \text{ K}$ $\overline{T_{BH}^I} = 220 \text{ K}$	26.04.12 – 11.05.12 19.06.13 – 16.07.13 19.06.14 – 06.07.14 22.05.15 – 18.06.15 16.05.16 – 07.06.16	12.05.12 – 28.12.12 17.07.13 – 25.11.13 07.07.14 – 10.11.14 19.06.15 – 10.12.15 08.06.16 – 13.12.16	29.12.12 – 26.01.13 26.11.13 – 25.12.13 13.11.14 – 26.12.14 11.12.15 – 15.01.16 14.12.16 – 18.02.17	27.01.13 – 18.06.13 26.12.13 – 18.06.14 27.12.14 – 21.05.15 16.01.16 – 15.05.16 19.02.17 – 04.05.17
4063891 $\overline{T_{BH}^W} = 82 \text{ K}$ $\overline{T_{BH}^I} = 223 \text{ K}$	30.04.12 – 03.06.12 19.06.13 – 14.07.13 16.06.14 – 01.07.14 24.05.15 – 23.06.15 11.06.16 – 30.06.16	04.06.12 – 24.12.12 15.07.13 – 28.10.13 02.07.14 – 21.10.14 24.06.15 – 24.11.15 01.07.16 – 14.12.16	25.12.12 – 23.01.13 29.10.13 – 10.12.13 22.10.14 – 15.11.14 25.11.15 – 12.01.16 15.12.16 – 13.01.17	24.01.13 – 18.06.13 11.12.13 – 15.06.14 16.11.14 – 23.05.15 13.01.16 – 10.06.16 14.01.17 – ...
4068512 $\overline{T_{BH}^W} = 83 \text{ K}$ $\overline{T_{BH}^I} = 222 \text{ K}$	29.01.12 – 04.02.12 10.05.12 – 10.06.12 13.06.13 – 04.07.13 15.05.14 – 23.07.14 03.06.15 – 06.07.15 26.04.16 – 14.06.16	05.02.12 – 24.02.12 11.06.12 – 06.12.12 05.07.13 – 26.10.13 24.07.14 – 17.10.14 07.07.15 – 24.11.15 15.06.16 – 23.12.16	25.02.12 – 24.03.12 07.12.12 – 10.01.13 27.10.13 – 05.12.13 18.10.14 – 19.11.14 25.11.15 – 05.12.15 24.12.16 – 13.02.17	25.03.12 – 09.05.12 11.01.13 – 12.06.13 06.12.13 – 14.05.14 20.11.14 – 02.06.15 06.12.15 – 25.04.16 14.02.17 – ...
4082841 $\overline{T_{BH}^W} = 82 \text{ K}$ $\overline{T_{BH}^I} = 228 \text{ K}$	28.05.12 – 23.06.12 12.06.13 – 26.07.13 07.06.14 – 26.07.14 23.05.15 – 04.06.15 20.05.16 – 24.06.16	24.06.12 – 24.11.12 27.07.13 – 15.10.13 27.07.14 – 18.10.14 05.06.15 – 29.10.15 25.06.16 – 26.11.16	25.11.12 – 22.12.12 16.10.13 – 27.10.13 19.10.14 – 07.11.14 30.10.15 – 18.11.15 27.11.16 – 13.12.16	23.12.12 – 11.06.13 28.10.13 – 06.06.14 08.11.14 – 22.05.15 19.11.15 – 19.05.16 14.12.16 – ...

Таблица 3.2. Длительность (в днях) фаз ледового режима для тестовых участков Карского моря

ID участка	Годы	Период ледостава	Период вскрытия	Период открытой воды	Период замерзания
4052100	2012	—		227	29
	2013	136	34	141	34
	2014	167	34	123	35
	2015	144	17	191	26
	2016	121	23	190	
	2017	—			
4055708	2012		23	206	20
	2013	149	20	142	23
	2014	142	66	118	18
	2015	183	30	170	31
	2016	120	26	222	33
	2017 (1)	18	4	14	10
	2017 (2)	49+			
4056717	2012		15	232	28
	2013	144	28	132	30
	2014	175	18	129	44
	2015	146	28	174	36
	2016	122	23	189	67
	2017	74			
4063891	2012		35	204	30
	2013	146	26	106	43
	2014	187	16	112	25
	2015	189	31	154	49
	2016	150	19	168	30
	2017	131+			
4068512	2012 (1)		6	21	29
	2012 (2)	45	33	179	35
	2013	153	22	114	40
	2014	160	70	86	33
	2015	195	34	141	10
	2016	143	50	192	52
	2017	104+			
4082841	2012		27	154	28
	2013	171	45	81	12
	2014	222	50	84	20
	2015	196	13	147	20
	2016	183	36	155	17
	2017	165+			

Таблица 3.3. Характеристики фаз ледового режима для участков Карского моря

ID участка	Годы	$\overline{T_{ВН}}$, К за период ледостава	Скорость вскрытия, К/сутки	$\overline{T_{ВН}}$, К за период открытой воды	Скорость заморзания, К/сутки
4052100	2012	—		82.9	22.4, 24.1
	2013	224.3	-5.2	83.9	5.4
	2014	222.3	-3.5	84.4	16.7, 9.5
	2015	215.3	-10.7	83.6	8.1
	2016	196.1	-4.9	84.2	
	2017	—			
4055708	2012		-5.2	82.0	11.8, 12.9
	2013	225.7	-5.3	82.5	7.0, 23.2
	2014	221.6	-8.3	82.1	6.7
	2015	208.1	-3.4	82.5	9.4
	2016	204.3	-4.5	83.6	3.4
	2017 (1) 2017 (2)	226.7 233.3	-32.5	82.2	9.8
4056717	2012		-5.2	82.7	3.5
	2013	227.5	-4.7	83.0	3.8
	2014	221.0	-5.9	83.0	9.7
	2015	223.6	-3.5	82.9	14.6
	2016	212.5	-12.6	82.3	7.6
	2017	212.6			
4063891	2012		-11.9	81.4	5.0
	2013	225.8	-2.6	82.5	19.6, 4.7
	2014	223.2	-12.3	83.6	10.6
	2015	228.2	-3.7	81.9	5.3, 5.2
	2016	224.2	-10.0	82.0	8.3
	2017	215.0			
4068512	2012 (1)		-19.6	84.5	3.5
	2012 (2)	215.6	-3.4	81.5	5.3
	2013	226.6	-6.0	82.5	31.0, 3.9
	2014	227.5	-4.0	83.8	7.1
	2015	226.1	-3.4	83.7	9.6
	2016	217.5	-3.3	82.2	32.5, 4.3
	2017	221.3			
4082841	2012		-4.2	80.9	6.7, 17.4
	2013	225.3	-6.8	82.6	7.9
	2014	226.9	-2.7	81.7	5.5
	2015	231.4	-7.7	83.8	10.4
	2016	230.0	-16.9	81.4	13.6, 24.8
	2017	224.1			

ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ЕЕ ПОЛНОЙ ДЕГРАДАЦИИ НА ПОЛУОСТРОВАХ ЯМАЛ И ГЫДАН ПО ДАННЫМ LANDSAT-8

В связи с изменением климата Арктики и освоением природных ресурсов Крайнего Севера, является актуальным использование спутниковых данных для выявления реакции тундровой растительности на различные природные и антропогенные воздействия и разработку систем мониторинга состояния тундровых экосистем. Растительность – центральный и один из наиболее доступных для наблюдения блоков экосистем, связанный прочными экологическими связями с другими блоками, что позволяет использовать растительный компонент для диагностики состояния всей экосистемы в целом.

Растительность тундровой зоны весьма динамична, существенный вклад в ее динамику вносит активизация таких экзогенных геоморфологических процессов, как криогенные оползни скольжения и дефляция, широко распространенные в тундровых экосистемах Гыдана и Ямала [Ермохина, 2009; Лейбман, 2007]. Активизация этих процессов обусловлена происходящим потеплением климата Арктики и антропогенным воздействием, которое, накладывается на естественную динамику экосистем и вносит в нее существенные изменения.

Разработка месторождений Ямала и Гыдана связана с усилением опасных экзогенных процессов, особенно дефляции и, в частности, полной деградации растительного покрова. Особенно активно происходит хозяйственное освоение

Ямала, что определяет увеличение антропогенной нагрузки на экосистемы региона, в том числе на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения.

С другой стороны, особенностью тундровой растительности является ее замедленное саморазвитие [Ермохина, 2009]. Среди геологических факторов, определяющих экологическую уязвимость растительного покрова тундры, выделяются песчаные наносы, массивный залежеобразующий лед, криогенные оползни:

Если бедные питательными веществами песчаные почвы однажды подвергаются воздействию, то последующее восстановление растительного покрова оказывается сложным процессом. Залежи подземного льда толщиной от 1 до 20 м находятся на границе раздела между слоем морской глины и вышезалегающими наносами. Удаление наносов, изменение тепловых и гидрологических условий, таяние льда ведет к криогенным оползням [Лейбман, 2007; Кронберг, 1988], полностью меняющим слой почвы, доступный растениям.

Особым свойством растительного покрова, в частности центральной части Ямала, являются ивовые заросли. Сукцессия растительности – один из важных аспектов, связанных с появлением ивовых зарослей в результате криогенного оползания. Заращение участков, нарушенных оползнями, происходит стадийно, и постепенно приводит к формированию сообществ с развитым ярусом из ивы сизой. Развитие таких ивняков вне долин водотоков отмечено в типичных тундрах Ямала и Гыдана (рис. 4.1).

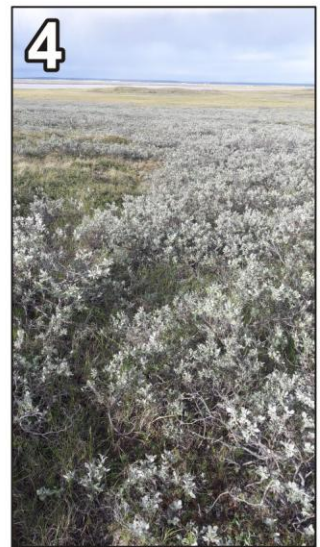


Рис. 4.1. Песчаные наносы и ивовые заросли центрального Ямала: окрестности Бованенково (фото Сысоевой Т.Г.)

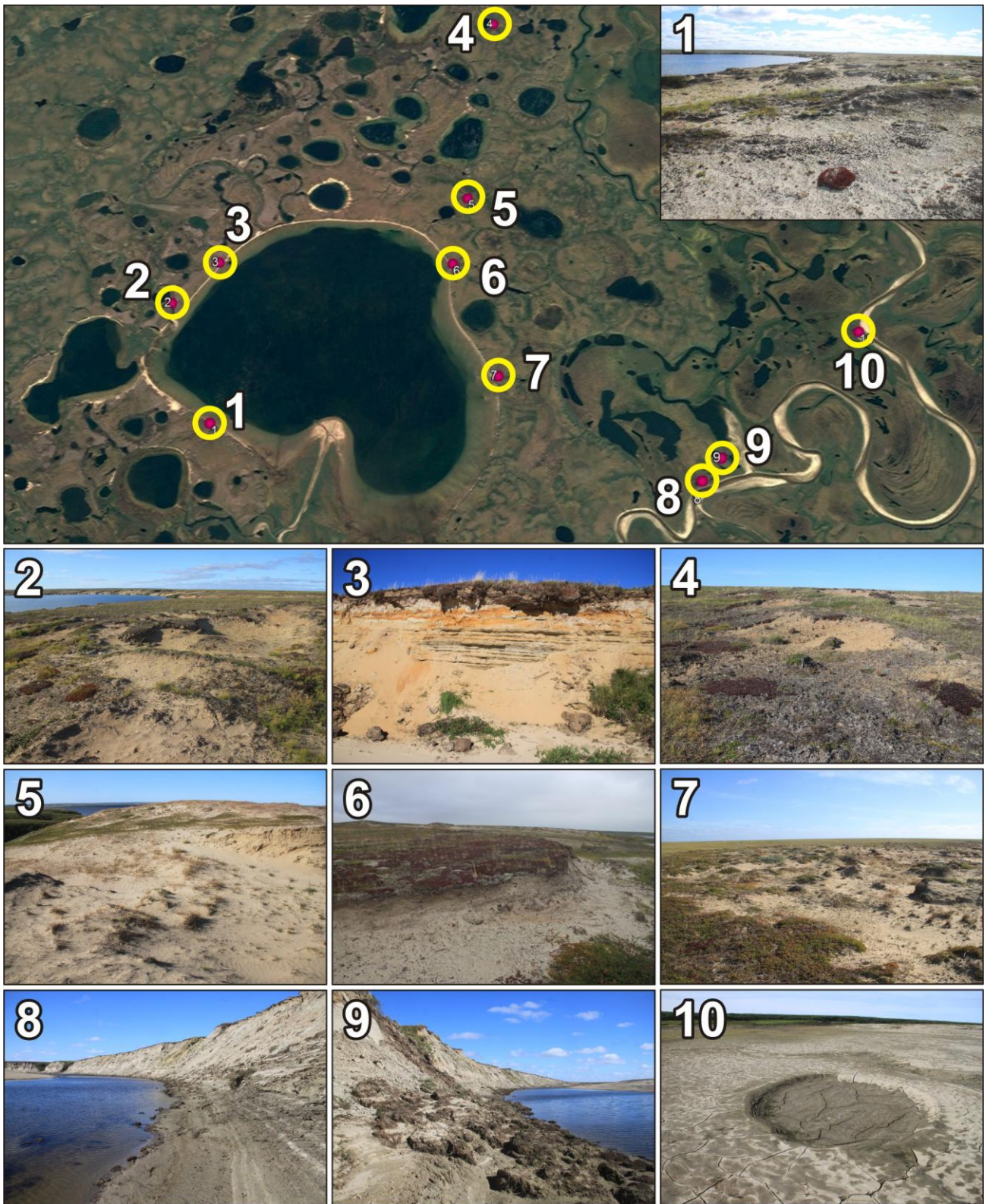


Рис. 4.2. Песчаные наносы на Гыдане: окрестности озера Парисенто (фото Романова А.Н.)

Следуя принципам экстраполяции индикационных закономерностей, установленные для Ямала связи растительности с ведущими экзогенными процессами возможно распространить на северную полосу подзоны типичных тундр Гыдана [Ермохина, 2009]. Оба полуострова лежат в одном секторе субполярной климатической зоны, их общая история развития проявляется в сходном геологическом строении. Развитие дефляции и криогенного оползания было отмечено как для Ямала, так и для Гыдана (рис. 4.2).

Поскольку растительность является наиболее важным компонентом экосистем Ямала и Гыдана, важно использовать эффективные вычислительные инструменты для анализа состояния растительного покрова, а также для получения оценок продуктивности и полной деградации растительности на основе доступных космических данных с достаточным пространственным и радиометрическим разрешением.

4.1. Анализ состояния растительности на основе спектральных преобразований

Отражение и поглощение растительностью падающих солнечных лучей зависят от длины волны света. Спектр здоровых зеленых листьев соответствует диапазону излучения 400-1000 нм (рис. 4.7):

1. В интервале длин волн 400-700 нм световой поток поглощается хлорофиллом, составляющим большую часть пигмента листа и обеспечивающим процесс фотосинтеза. Хлорофилл поглощает солнечные лучи синей (Landsat-8: 435-512 нм) и красной (Landsat-8: 636-673 нм) частей спектра. Отражение солнечных лучей в зеленой части спектра обуслови-

вает зеленый цвет здоровой листвы и небольшой максимум в соответствующем диапазоне (Landsat-8: 533-590 нм).

2. В ближнем инфракрасном (БИК; Landsat-8: 851-879 нм) диапазоне отражательная способность растительности определяется внутренней клеточной структурой мягкой ткани листа. В этом интервале отражение солнечной энергии наиболее сильно, величина его составляет от 30 до 70% падающего потока излучения в зависимости от вида растительности.

Эти характерные особенности спектрального отражения позволяют использовать космические снимки для оценки состояния растительности на основе преобразований исходных спектральных значений в элементах растра. Одним из наиболее известных преобразований на основе использования особенностей спектральной отражательной способности растительности является нормализованный разностный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), или [Rouse, 1973]:

$$\text{NDVI} = \text{Func}(\text{NIR}, \text{Red}),$$

где NIR – коэффициент отражения в ближней инфракрасной (БИК) спектральной зоне, Red – коэффициент отражения в красной спектральной зоне.

Для зеленой растительности NDVI обычно принимает положительные значения, но при этом индекс не позволяет проводить четкого различия между здоровой и поврежденной растительностью (рис. 4.3, 4.4).

Для выделения элементов растра, соответствующих участкам здоровой растительности использовалось преобразование, основанное на различии спектральных значений в БИК-диапазоне и синей части спектра:

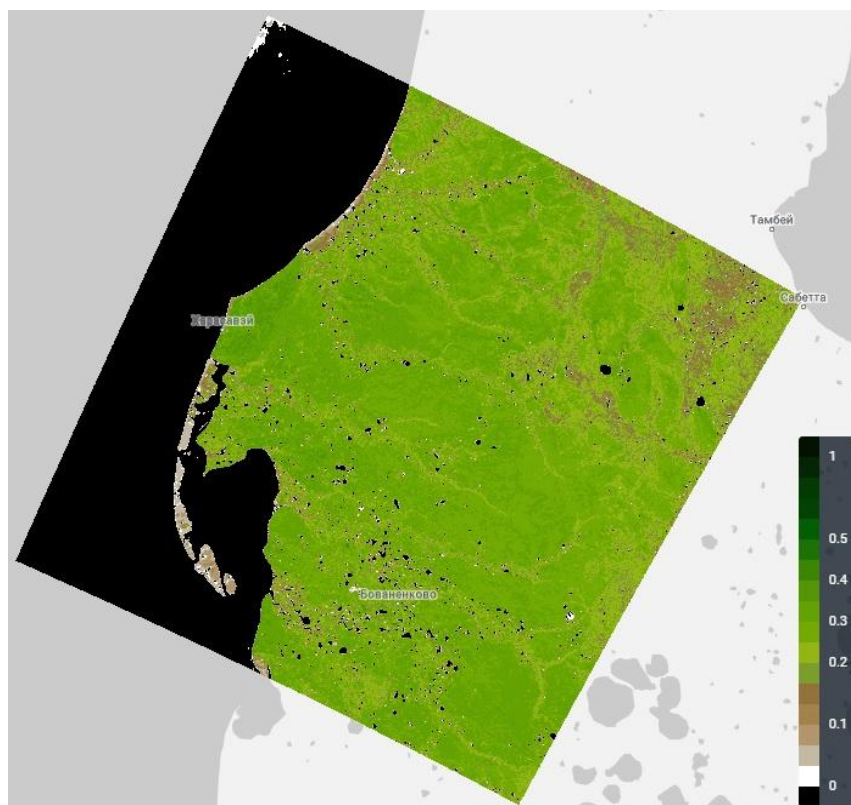


Рис. 4.3. Значения NDVI для центрального Ямала по данным Landsat-8 (12.08.2016)

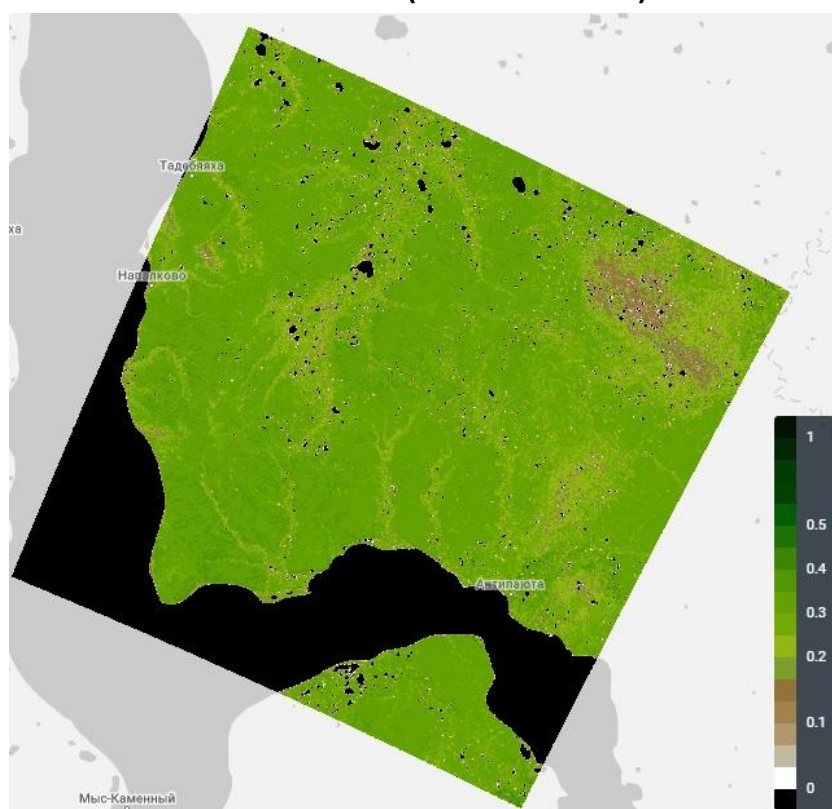


Рис. 4.4. Значения NDVI для Гыдана по данными Landsat-8 (01.07.2016)

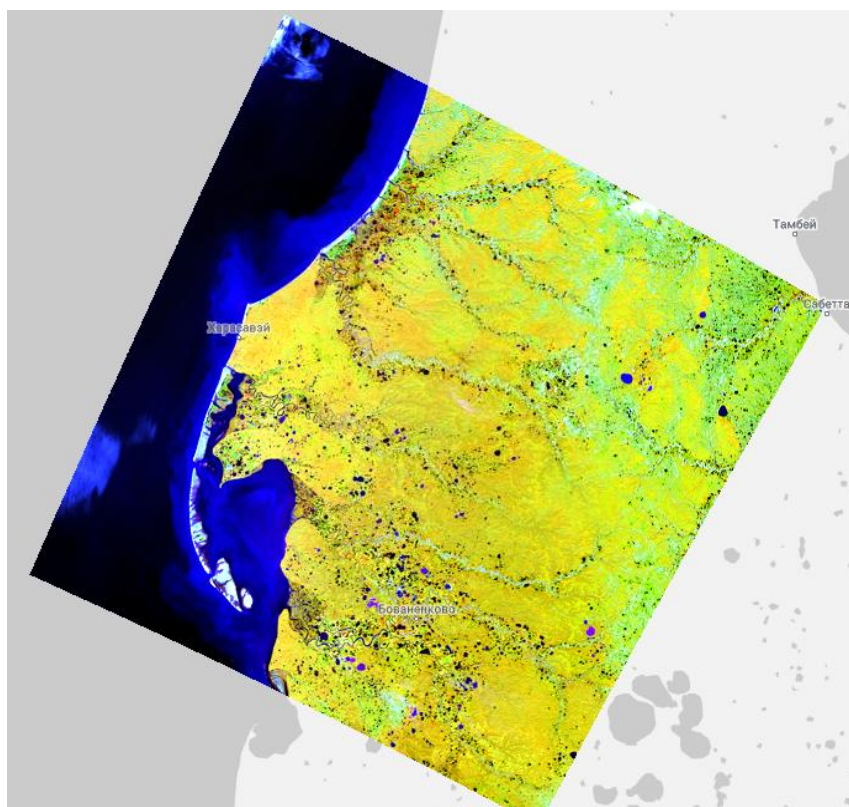


Рис. 4.5. Значения Healthy_Veg для центрального Ямала по данным Landsat-8 (12.08.2016)

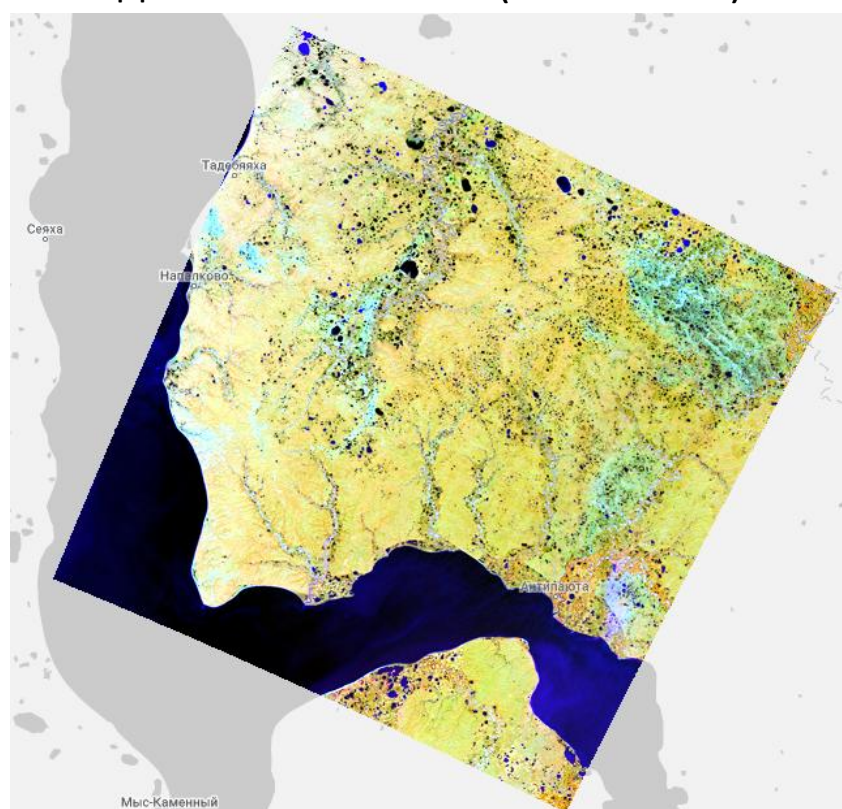


Рис. 4.6. Значения Healthy_Veg для части Гыдана по данным Landsat-8 (01.07.2016)

$$\text{Healthy_Veg} = \text{Func}(\text{NIR}, \text{Blue}),$$

где NIR – коэффициент отражения в БИК спектральной зоне, Blue – коэффициент отражения в синей спектральной зоне.

На полученных результатах здоровая растительность представлена оттенками красного, коричневого, оранжевого и желтого цвета (рис. 4.4, 4.6).

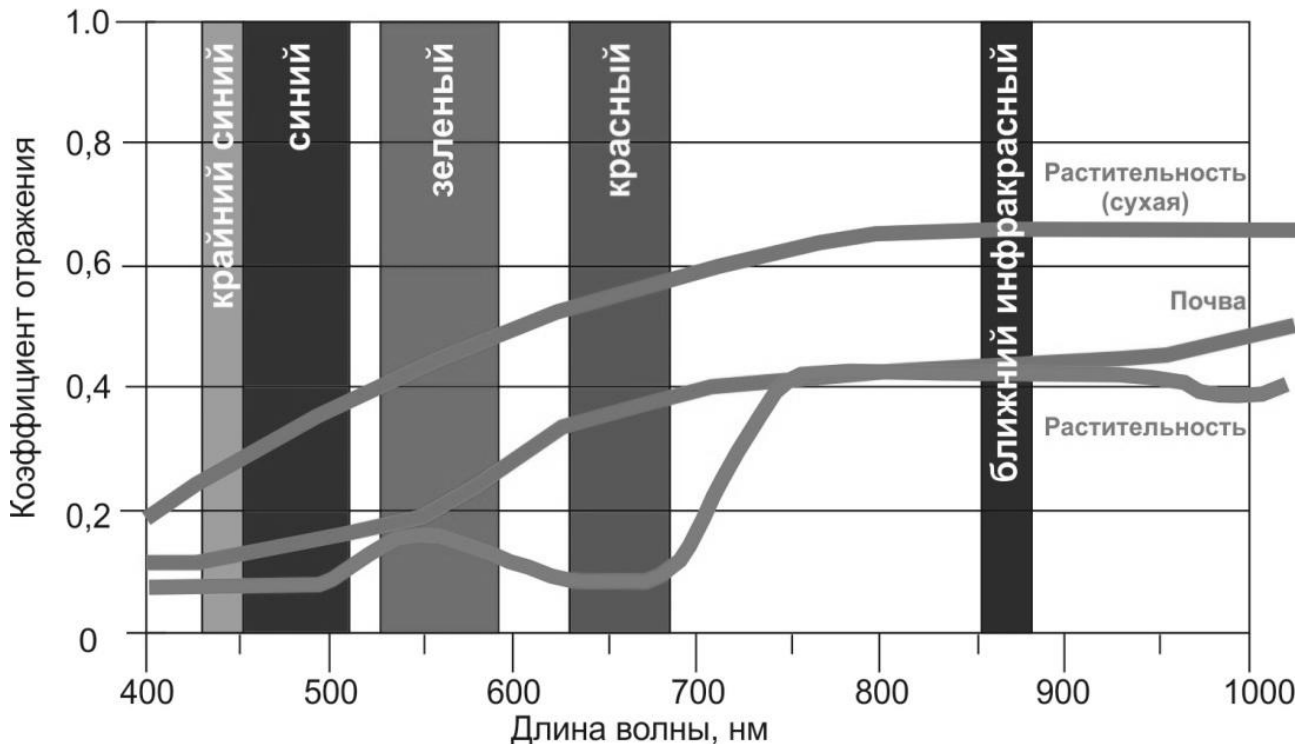


Рис. 4.7. Спектральная отражательная способность растительности [Кронберг, 1988] и спектральные диапазоны, соответствующие данным Landsat-8

4.2. Оценка изменения продуктивности растительности

Для оценки суммарного воздействия различных естественных и антропогенных факторов (быстрого изменения климата, экологической чувствительности зоны вечной мерзлоты, развития оленеводства и нефтегазового бума) на изменение продуктивности растительного покрова полуострова

Ямал и полуострова Гыдан используются оценки MaxNDVI, характеризующие продуктивность растительности и позволяющие проводить исследования в контексте глобальных экологических изменений арктических регионов [Ковалевская, 2016]. В частности, для Ямала оказалось, что хотя продуктивность растительного покрова полуострова выше, чем в большинстве частей арктической системы, тем не менее, скорость ее роста принимает низкие значения.

Для детального изучения пространственно-временных закономерностей изменения растительности на Ямале и Гыдане был создан специальный тематический каталог снимков (ТКС) «ЯНАО-Landsat-8/OLI», обеспечивающий покрытия растительности на территории ЯНАО. ТКС «ЯНАО-Landsat-8/OLI» представляет временные ряды индекса фотосинтетической активности (NDVI), полученные оптико-электронным сенсором OLI (Operational Land Imager) с пространственным разрешением 30 м [<https://landsat.usgs.gov/landsat-8>]. Данные были получены для периода вегетации (май-октябрь) 2013-2017 гг. Продуктивность растительности вычислялась на основе SNAP/ESA 2.0.2, как максимальное значение (MaxNDVI) для заданного периода времени (день, месяц, год). Динамика сезонного изменения растительности в 2013-2015 гг., полученная на основе этого каталога представлена на рисунке 4.8.

В соответствии с циркумполярной картой арктической растительности растительность Ямала представлена четырьмя из пяти тундровых биоклиматических подзон, а также северной бореальной тайгой [Walker, 2005]. Одним из основных аспектов многочисленных арктических исследований является влияние потепления климата на продуктивность расти-

тельности, представленной с помощью NDVI. Известно, что в большинстве арктических регионов NDVI-значения сильно коррелируют с количеством летнего тепла [Raynolds, 2008a]. Оказалось, что это общая циркумполярная гипотеза (уменьшения NDVI-значений с уменьшением широты и соответственным уменьшением летнего тепла) не подтверждается для полуострова Ямал.

Существенный вклад в пространственное распределение продуктивности растительности на Ямале вносят особенности рельефа (29%) и особенности криогенных ландшафтов (20%) [Walker, 2005]. Результаты анализа спутниковых данных дают основания предположить, что за последние более, чем три десятка лет на Ямале произошло относительно небольшое (по сравнению с другими арктическими регионами) увеличение продуктивности растительности и незначительное повышение приповерхностных температур. Но при этом, характеризующий продуктивность параметр MaxNDVI принимает значение выше, чем в большинстве других арктических регионов. Этот факт можно предположительно объяснить особенностями рельефа и ландшафтной структуры Ямала, в т.ч. присутствием криогенного оползания вызывающего появление большого количества ивовых зарослей.

4.3. Выделение участков полной деградации растительного покрова

Структура растительного покрова кустарничково-мохово-лишайниковых тундр мозаична, что определяется микро-рельефом – микроповышения являются очагами дефляции. Переходы между сообществами плавные на первых этапах

дефляции и резкие при высокой степени развешанности. Поскольку развитие дефляции оказывает максимальный вклад в динамику растительности (таблицы 4.1 и 4.2) по сравнению с другими экологическими факторами, важно иметь эффективные средства выделения участков, в частности, полной деградации растительности [Ермохина, 2009].

В качестве такого инструмента использовалась сегментация многозональных космических изображений на основе классификации сигнатур сигналов. Из-за сложности наблюдаемых объектов использовались:

Вероятностный (статистический) подход к сегментации многозональных изображений, в котором единичным объектом распознавания считается сигнатура сигналов для элемента растра (пиксела).

Статистическая модель сигналов, в которой обрабатываемое изображение считается выборочной реализацией случайного поля с независимыми в статистическом смысле компонентами (НСП-модель).

Пусть $c = (c(m, n) : (m, n) \in \Omega)$ – исходное многозональное изображение, заданное на прямоугольном растре Ω ; $c(m, n) = (cl(m, n) : l = 1, \dots, L)$ – сигнатура исходных сигналов в элементе $(m, n) \in \Omega$; L – число зон, используемых в обработке исходного изображения; $h = (h(m, n) : (m, n) \in \Omega)$ – результирующее тематическое изображение, полученное в процессе обработки и представленное на том же растре Ω ; $h(m, n)$ – значение тематического изображения (метка участка или класса) в элементе $(m, n) \in \Omega$; $h(m, n) \in H = \{1, \dots, K\}$, K – число участков (классов) заданных для классификации.

В соответствии с НСП-моделью совместное распределение вероятностей значений сигнатур входных сигналов можно рассматривать, как произведение распределений для отдельных сигнатур:

$$P(c) = \prod_{(m,n) \in \Omega} P(c(m,n)) = \prod_{(m,n) \in \Omega} \sum_{h(m,n)=1}^K P_a(h(m,n)) P_c(c(m,n) | h(m,n)), \quad (4.1)$$

где $P_a(h(m,n))$ – априорная вероятность метки $h(m,n) = k$, $k \in H = \{1, \dots, K\}$, для элемента $(m,n) \in \Omega$; $P_c(c(m,n) | h(m,n))$ – условные вероятности значений сигнатур сигналов $c(m,n) \in V$ для элемента k -участка, $(m,n) \in \Omega$.

При неизвестных априорных вероятностях $P_a(\cdot)$, ноль-единичной матрице потерь от ошибочных решений и известных условных распределениях $P_c(\cdot)$ тематическое изображение может быть построено по критерию максимального правдоподобия, то есть путем выбора в каждом элементе раstra решения, соответствующего максимально правдоподобной (МП) оценке:

$$h(m,n) = \underset{k}{\operatorname{argmax}} P_c(c(m,n) | k) \quad (4.2)$$

Для многомерного нормального распределения вероятностей значений сигнатур на каждом участке МП-классификация (2) реализуется квадратичным или линейным решающим правилом [Дуда, 1976].

В исследовании использовалось программное обеспечение ERDAS Imagine 2013. Прямоугольные растры Ω , выбранные для обработки многозональных изображений части Центрального Ямала (окрестности Бованенково) и части Гыдана (окрестности оз. Парисенто) представлены на рисунках 4.9, 4.10. Рисунки 4.11-4.13 представляют результаты классифика-

ции, соответствующие МП-оценкам для $L=5$ (Coastal; Blue; Green; Red; NIR) и $K=3$ (водные поверхности; растительность; территория, лишенная растительности). Эти и подобные результаты показывают, насколько тундры центрального Ямала (окрестности Бованенково) и Гыдана (окрестности озера Парисенто) были подвержены полной деградации растительности в 2016-2017 гг.

Таким образом, существующий вычислительный аппарат может быть использован для спектрального анализа растительного покрова и выделения участков полной деградации растительности на основе обработки космических данных Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м и пятью зонами в видимом и БИК спектре (Coastal, Blue, Green, Red, NIR).

Полуостров Ямал и полуостров Гыдан, с одной стороны, являются регионами особых геологических и антропогенных условий, а с другой стороны – частью глобальной арктической системы, испытывающей на себе последствия изменения климата. Поскольку оба этих фактора обуславливают высокий уровень изменчивости растительного покрова, исследование этих территорий должно проводиться, как с учетом их уникальных особенностей, так и с учетом опыта исследования других арктических регионов земного шара.

Для тундр центрального Ямала и Гыдана [Ермохина, 2009; Тыртиков, 1969]:

- 1) остается неясным, в какой последовательности сменяются сообщества в ходе сукцессий;
- 2) структура и динамика растительности значительно отличаются на разнотипных поверхностных отложениях в связи с различиями в ведущих экзогенных процессах;

3) структура и состав растительных сообществ являются индикаторами мерзлотных условий деятельного слоя, в том числе его мощности.

В соответствии с этим, особое значение приобретает изучение динамики мозаичности растительных сообществ Ямала и Гыдана. Для этого могут быть эффективно использованы данные спутника Sentinel-2 европейского космического агентства [<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>] с пространственным разрешением до 10 м и девятью зонами в видимом и БИК-спектре (Coastal, Blue, Green, Red, RedEdge1, RedEdge2, RedEdge3, NIR1, NIR2), что предполагается быть следующим шагом исследования.

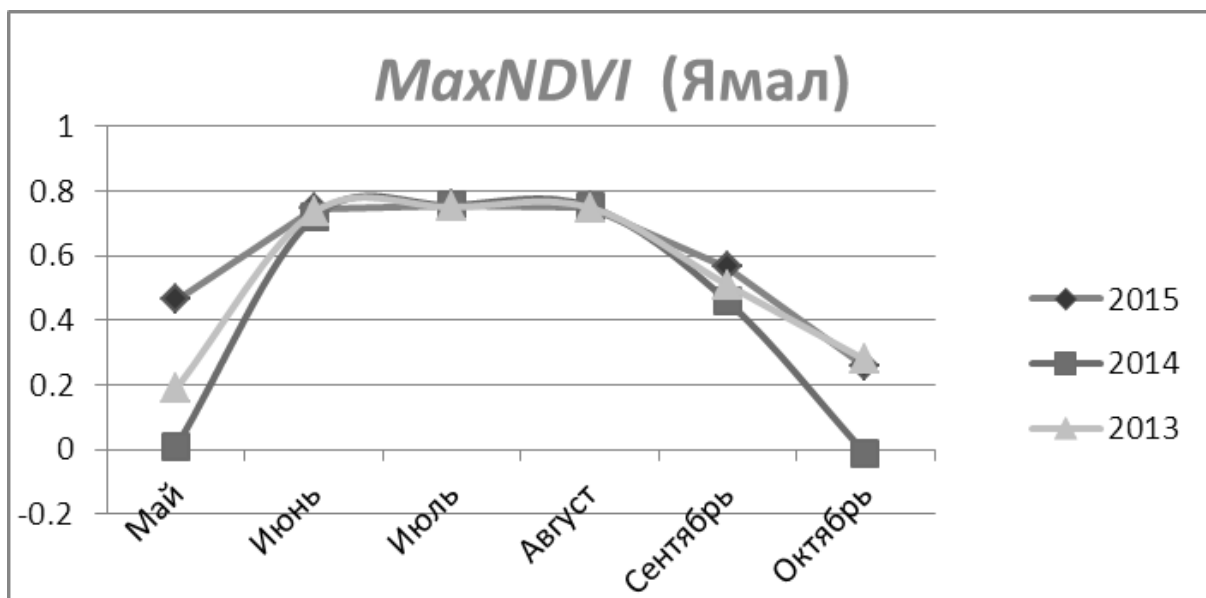


Рис. 4.8. Изменение продуктивности на Ямале по данным Landsat-8 за период с 2013 по 2015 годы

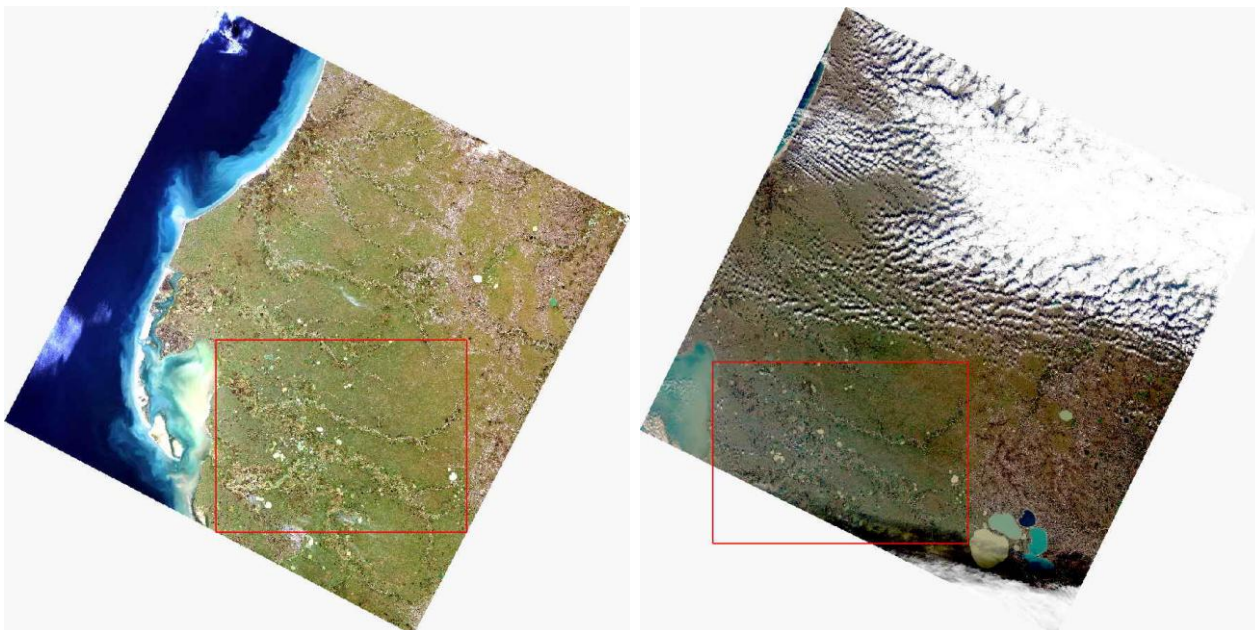


Рис. 4.9. Области обработки снимков Landsat-8 (12.08.2016 и 24.08.2017) для центрального Ямала



Рис. 4.10. Снимок Landsat-8 (01.07.2016) окрестностей озера Парисенто, использованный для обработки

Таблица 4.1.

	Стадии дефляции	Процент открытого песка	NDVI
1	Стадия условно-коренных сообществ	0-35%	> 0.25
2	Стадия слабого развеивания	35-48%	0.2-0.25
3	Стадия умеренного развеивания	48-64%	0.1-0.2
4	Стадия сильного развеивания	64-77%	< 0.1
5	Стадия полной деградации растительности	77-100%	< 0.1

Таблица 4.2.

	Стадии восстановления растительности	NDVI
1	Начальная стадия	0.00-0.27
2	Промежуточная стадия (до 300 лет)	0.34-0.40
3	Поздняя стадия (до 2000 лет)	> 0.4

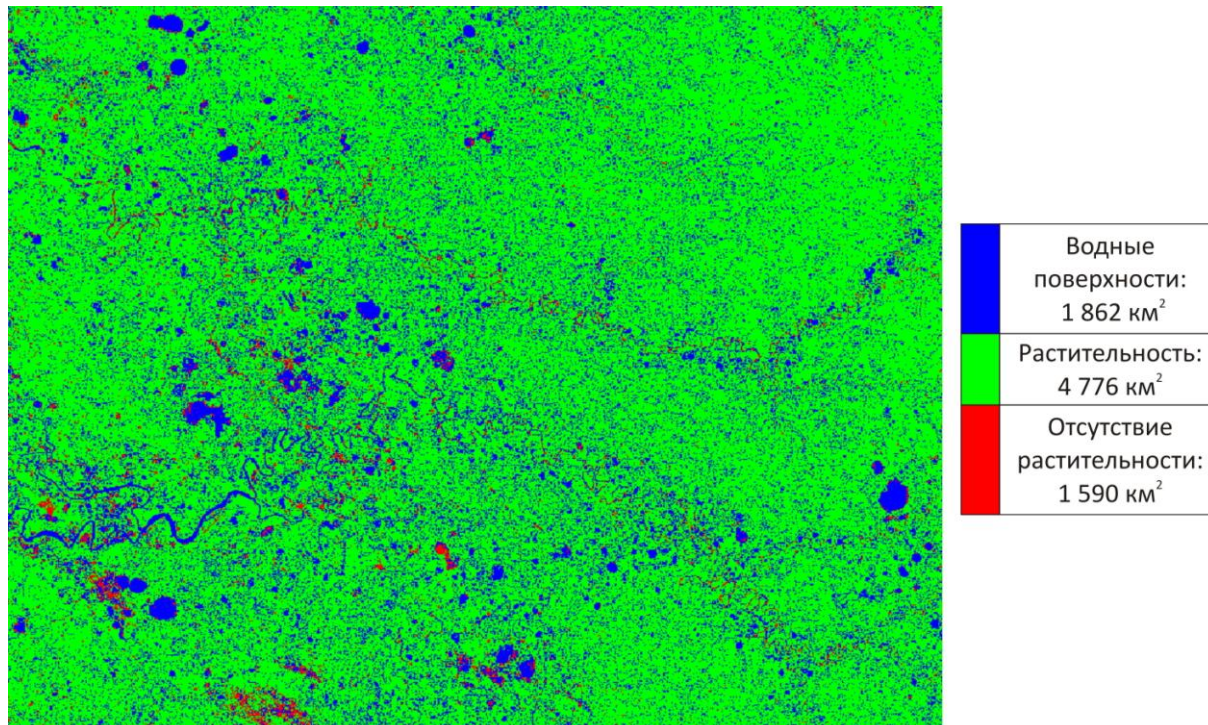


Рис. 4.11. Тематическое изображение, полученное в результате обработки (части на рис. 4.9) снимка Landsat-8 (12.08.2016)

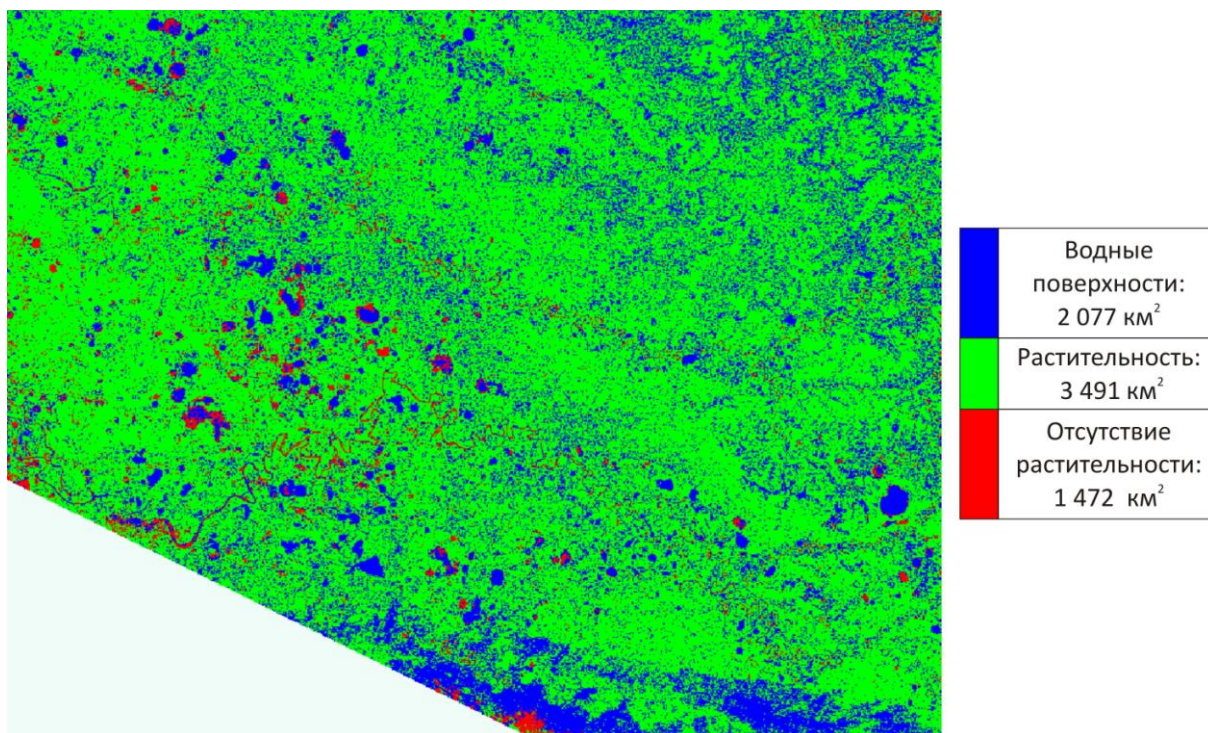


Рис. 4.12. Тематическое изображение, полученное в результате обработки (части на рис. 4.9) снимка Landsat-8 (24.08.2017)

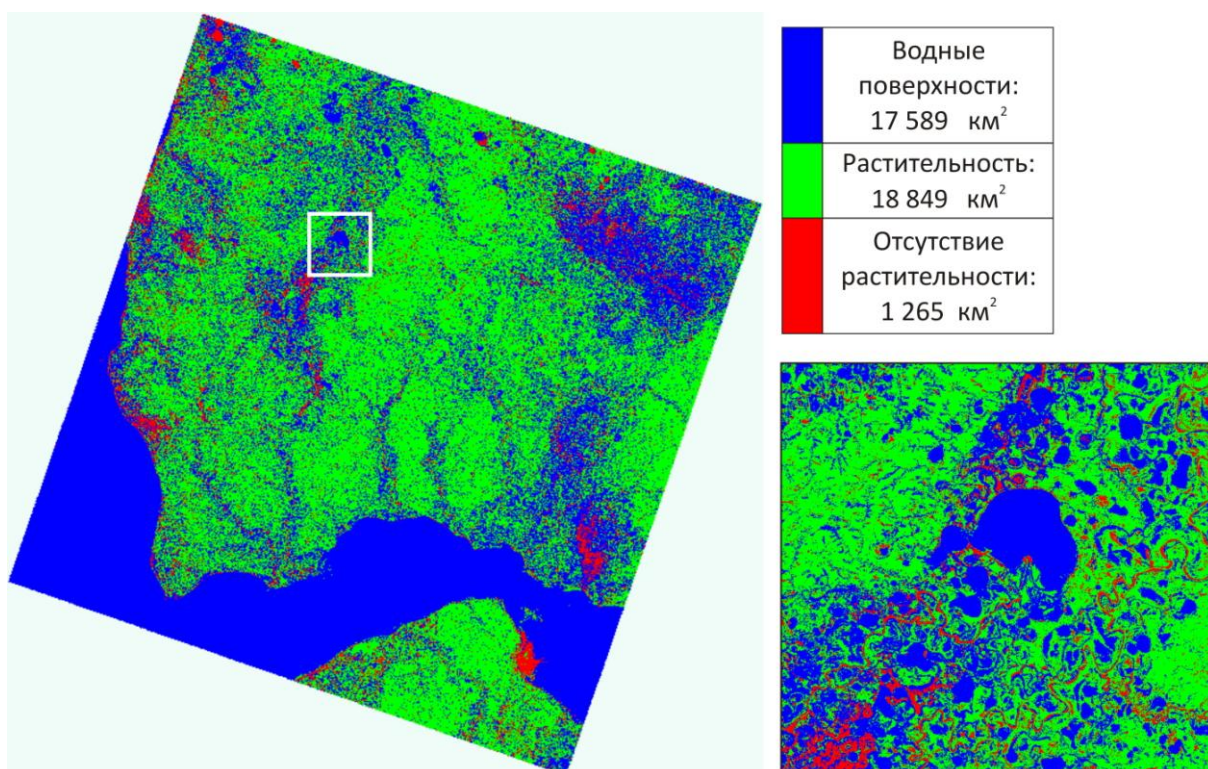


Рис. 4.13. Тематическое изображение, полученное в результате обработки снимка Landsat-8 (01.07.2016, рис. 4.10)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что диэлектрические свойства тундровой растительности различаются. Заметное изменение диэлектрических и радиоизлучательных характеристик растительности происходит при ее отмирании. Соответственно, диэлектрические и радиоизлучательные параметры растительности могут выступать в качестве индикаторов деградации растительного покрова тундры.

Установлена обобщенная зависимость диэлектрических характеристик тундровой растительности, которая может быть использована для оценки влажностных характеристик растительного покрова по измеренным дистанционным способом радиоизлучательным характеристикам подстилающей поверхности тундры при условии, что микроволновое излучение формируется растительным покровом.

На примере карликовой березы и карликовой ивы показано, что радиоизлучательные характеристики древесной тундровой растительности в теплый и холодный сезоны года отличаются. Из этого следует вывод о необходимости учета сезонных различий радиоизлучательных характеристик древесной растительности тундры при интерпретации данных дистанционного микроволнового зондирования.

Приведены результаты космического мониторинга тундры на территории полуострова Гыданский (ЯНАО). На основе анализа сезонных вариаций радиояркостных температур подстилающей поверхности, измеренных со спутника SMOS, для исследуемой территории за период с 2012 по 2016 годы выделены временные периоды с различным поведением ра-

диоизлучательных характеристик почвенного покрова, связанные с сезонным оттаиванием вечной мерзлоты.

Приведены карты-схемы пространственного распределения радиоярких температур, построенные по данным спутника SMOS. Из анализа спутниковых данных следует, что наблюдаются значительные сезонные вариации микроволнового излучения подстилающей поверхности, связанные с сезонным оттаиванием поверхностного слоя вечной мерзлоты, а также с изменением температуры окружающей среды.

Установлена связь сезонных вариаций радиоярких температур акватории Карского моря с гидролого-климатическими изменениями в Арктике. На основе анализа временных рядов радиояркой температуры определены сезонные границы периодов открытой воды, замерзания, ледостава и вскрытия для выбранных участков Карского моря. Приведены тренды продолжительности периодов открытой воды и ледостава, указывающие на гидрологические изменения, происходящие в Арктике.

Изучены возможности исследования состояния растительности и ее полной деградации на полуостровах Ямал и Гыдан по данным Landsat-8. Осуществлен анализ состояния растительности на основе спектральных преобразований. Для оценки суммарного воздействия различных естественных и антропогенных факторов на изменение продуктивности растительного покрова полуострова Ямал и полуострова Гыдан использован индекс MaxNDVI, характеризующий продуктивность растительности. Выделены области полной деградации растительного покрова на тестовом участке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Al-Yaari A., Wigneron J.-P., Ducharne A., Kerr Y., Mialon A. Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to land data assimilation system estimates // *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 149, P. 181-195.
2. Albergel C., Zakharova E., Calvet J.-C., Zribi M., Pardé M., Wigneron J.-P., Novello N., Kerr Y., Mialon A., Fritz N.D. A first assessment of the SMOS data in southwestern France using in situ and airborne soil moisture estimates: The CAROLS airborne campaign // *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, Is. 10, P. 2718-2728.
3. Anderson M.R., Crane R.G., Barry R.G. Characteristics of arctic ocean ice determined from SMMR data for 1979: Case studies in the seasonal sea ice zone // *Advances in Space Research*, 1985, Vol. 5, Is. 6, P. 257-261. URL: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90329-1](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90329-1)
4. Anguelova M.D., Gaiser P.W. Microwave emissivity of sea foam layers with vertically inhomogeneous dielectric properties // *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 139, P. 81-96. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.017>
5. Ballabrera-Poy J., Mourre B., Garcia-Ladona E. et al. Linear and non-linear T–S models for the eastern North Atlantic from Argo data: Role of surface salinity observations // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, Vol. 56, Is. 10, P. 1605-1614. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2009.05.017>
6. Barbosa J., Gutierrez A. SMOS L1 Processor L0 to L1a Data Processing Model. 2014. SO-DS-DME-L1OP-0007. Issue 2.18. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1a-Data-Processing-Models
7. Bareiss J., Görden K. Spatial and temporal variability of sea ice in the Laptev Sea: Analyses and review of satellite passive-microwave

data and model results, 1979 to 2002 // *Global and Planetary Change*, 2005, Vol. 48, Is. 1–3, P. 28-54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.12.004>

8. Belchansky G.I., Douglas D.C., Mordvintsev I.N., Platonov N.G. Estimating the time of melt onset and freeze onset over Arctic sea-ice area using active and passive microwave data // *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 92, Is. 1, P. 21-39. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.05.001>

9. Bergamaschi P., Houweling, S., Segers, A., et al. Atmospheric CH₄ in the first decade of the 21st century: inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, Vol. 118, P. 7350–7369.

10. Birchak J.R., Gardner G.G., Hipp J.E., Victor J.M. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture // *Proc. IEEE*, 1974, Vol. 62, No 1, P. 93-98.

11. Brassington G.B., Divakaran P. The theoretical impact of remotely sensed sea surface salinity observations in a multi-variate assimilation system // *Ocean Modelling*, 2009, Vol. 27, Is. 1–2, P. 70-81. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.12.005>

12. Bring A., Destouni G. Hydro-climatic changes and their monitoring in the Arctic: Observation-model comparisons and prioritization options for monitoring development // *Journal of Hydrology*, 2013, Vol. 492, P. 273-280. URL: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.005>

13. Buchkina N.P., Zuyev V.S., Balashov E.V. Effects of tracked vehicles on the morphological and physical properties of tundra soils // *Soil and Tillage Research*, 1998, Vol. 48, Issue 4, P. 317-324.

14. Drobot S.D. Using remote sensing data to develop seasonal outlooks for Arctic regional sea-ice minimum extent // *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 111, Is. 2–3, P. 136-147. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.024>

15. Evans R. Soil erosion in the UK initiated by grazing animals: A need for a national survey // *Applied Geography*, 1997, Vol. 17, Issue 2, P. 127-141.
16. Forbes B.C, Jefferies R.L Revegetation of disturbed arctic sites: constraints and applications // *Biological Conservation*, 1999, Vol. 88, Is. 1, P. 15-24.
17. Geldsetzer T., Langlois A., Yackel J. Dielectric properties of brine-wetted snow on first-year sea ice // *Cold Regions Science and Technology*, 2009, Vol. 58, Is. 1-2, P. 47-56.
18. Grant J.P., Wigneron J.-P., De Jeu R.A.M., Lawrence H., Mialon A., Richaume P., Al Bitar A., Drusch M., van Marle M.J.E., Kerr Y. Comparison of SMOS and AMSR-E vegetation optical depth to four MODIS-based vegetation indices // *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 72, P. 87-100.
19. Gravalos I., Moshou D., Loutridis S., Gialamas Th., Kateris D, Bompolas E., Tsiropoulos Z., Xyradakis P., Fountas S. 2D and 3D soil moisture imaging using a sensor-based platform moving inside a sub-surface network of pipes // *Journal of Hydrology*, 2013, Vol. 499, P. 146-153.
20. Gutierrez A., Castro R., Catarino N. (2014a) SMOS L1 Processor L1a to L1b Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0008. Issue 2.19. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1b-Data-Processing-Models
21. Gutierrez A., Castro R., Vieira P. (2014b) SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0009. Issue 2.14. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models
22. Harris C. et al. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses // *Earth-Science Reviews*, 2009, Vol. 92, Is. 3-4, P. 117-171.
23. Hoareau N., Umbert M., Martínez J., Turiel A., Ballabrera-Poy J. On the potential of data assimilation to generate SMOS-Level 4 maps

of sea surface salinity // *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 146, P. 188-200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.005>

24. Karlsson J.M., Jaramillo F., Destouni G. Hydro-climatic and lake change patterns in Arctic permafrost and non-permafrost areas // *Journal of Hydrology*, 2015, Vol. 529, Part 1, P. 134-145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.005>

25. Kashulina G., Reimann C., Finne T.E., Halleraker J.H., Äyräs M., Chekushin V.A. The state of the ecosystems in the central Barents Region: scale, factors and mechanism of disturbance // *Science of The Total Environment*, 1997, Vol. 206, Is. 2-3, P. 203-225.

26. Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martí'n-Neira M., Mecklenburg S. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proceedings of IEEE*, 2010, Vol.98, Is. 5, P. 666-687.

27. Konings A.G., Piles M., Rötzer K., McColl K.A., Chan S.K., Entekhabi D. Vegetation optical depth and scattering albedo retrieval using time series of dual-polarized L-band radiometer observations // *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 172, P. 178-189.

28. Konya K., Kadota T., Yabuki H., Ohata T. Fifty years of meteoroglaciological change in Toll Glacier, Bennett Island, De Long Islands, Siberian Arctic // *Polar Science*, 2014, Vol. 8, Is. 2, P. 86-95. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2013.10.002>

29. Koven C.D., Riley W.J., Stern A. Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth system models // *J. Clim*, 2013, Vol. 26, P. 1877–1900.

30. Krapivin V.F., Shutko A.M., Chukhlantsev A.A., Golovachev S.P., Phillips G.W. GIMS-based method for vegetation microwave monitoring // *Environmental Modelling & Software*, 2006, Vol. 21, Issue 3, P. 330-345.

31. Komarov S.A., Mironov V.L. and Romanov A.N. Frequency dispersion in microwave for complex permittivity of bound water stored in soils and wet salts // IGARSS'99, 1999, Vol. 5, P. 2643-2645.

32. Kozak K., Polkowska Ż., Ruman M., Kozioł K., Namieśnik J. Analytical studies on the environmental state of the Svalbard Archipelago provide a critical source of information about anthropogenic global impact // TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2013, Vol. 50, P. 107-126.

33. Lemmetyinen J., Kontu A., Kärnä J.-P., Vehviläinen J., Pulliainen J. Correcting for the influence of frozen lakes in satellite microwave radiometer observations through application of a microwave emission model // Remote Sensing of Environment, 2011, Vol. 115, Is. 12, P. 3695-3706.

34. McCulloch M.E., Spurgeon P., Chuprin A. Have mid-latitude ocean rain-lenses been seen by the SMOS satellite? // Ocean Modelling, 2012, Vol. 43-44, P. 108-111. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.12.005>

35. Millard K., Richardson M. Quantifying the relative contributions of vegetation and soil moisture conditions to polarimetric C-Band SAR response in a temperate peatland // Remote Sensing of Environment, 2018, Vol. 206, P. 123-138.

36. Mulder V.L., de Bruin S., Schaepman M.E., Mayr T.R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A Review Article // Geoderma, 2011, Vol. 162, Is. 1-2, P. 1-19.

37. Mulet S., Rio M.-H., Mignot A. et al. A new estimate of the global 3D geostrophic ocean circulation based on satellite data and in-situ measurements // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2012, Vol. 77-80, P. 70-81. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.012>

38. Norouzi H., Temimi M., Kouchak A.A., Azarderakhsh M., Tesfagiorgis K. Inferring land surface parameters from the diurnal variability of microwave and infrared temperatures // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, Vol. 83-84, P. 28-35

39. Qing S., Zhang J., Cui T., Bao Y. Retrieval of sea surface salinity with MERIS and MODIS data in the Bohai Sea // Remote Sensing of Environment, 2013, Vol. 136, P. 117-125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.016>
40. Olmedo E., Martínez J., Umberto M., Hoareau N., Portabella M., Ballabrera-Poy J., Turiel A. Improving time and space resolution of SMOS salinity maps using multifractal fusion // Remote Sensing of Environment, 2016, Vol. 180, P. 246-263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.038>
41. Oostdam V., Donaldson S.G., Feeley M., Arnold D., Ayotte P., Bondy G., Chan L., Dewailly É., Furgal C.M., Kuhnlein H., Loring E., Muckle G., Myles E., Receveur O., Tracy B., Gill U., Kalhok S. Human health implications of environmental contaminants in Arctic Canada: A review // Science of The Total Environment, 2005, Vol. 351-352, P. 165-246.
42. Paloscia S., Pampaloni P. Microwave vegetation indexes for detecting biomass and water conditions of agricultural crops // Remote Sensing of Environment, 1992, Vol. 40, Is. 1, P. 15-26.
43. Panciera R., Walker J.P., Kalma J., Kim E. A proposed extension to the soil moisture and ocean salinity level 2 algorithm for mixed forest and moderate vegetation pixels // Remote Sensing of Environment, 2011, Vol. 115, Is. 12, P. 3343-3354.
44. Parrens M. et al. Benchmarking of L-band soil microwave emission models // Remote Sensing of Environment, 2014, Vol. 140, P. 407-419.
45. Parrens M., Wigneron J.-P., Richaume P., Mialon A., Kerr Y.H. Global-scale surface roughness effects at L-band as estimated from SMOS observations // Remote Sensing of Environment, 2016, Vol. 181, P. 122-136.
46. Peischl S., Walker J.P., Ye N., Ryu D., Kerr Y. Sensitivity of multi-parameter soil moisture retrievals to incidence angle configuration // Remote Sensing of Environment, 2014, Vol. 143, P. 64-72.

47. Polukhin A.A., Makkaveev P.N. Features of the continental runoff distribution over the Kara Sea // *Oceanology*, 2017, Vol. 57, Is. 1, P. 19-30.

48. Poursanidis D., Chrysoulakis N. Remote Sensing, natural hazards and the contribution of ESA Sentinels missions // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2017, Vol. 6, P. 25-38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.02.001>

49. Prakash S., Gairola R.M. Estimation of sea surface salinity in the tropical Indian Ocean by synergistic use of SMOS and RAMA buoy data // *Methods in Oceanography*, 2013, Vol. 8, P. 33-40. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mio.2014.06.003>

50. Reynolds M.K., Comiso J.C., Walker D.A., Verbyla D. Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI // *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, Is. 4, P. 1884-1894.

51. Relloso F.G., Zapata M. SMOS DPGS L0 Product Specifications. 2010. SO-TN-IDR-GS-0003. Is. 3.5. https://earth.esa.int/documents/10174/479378/SMOS_Level-0_product_specifications

52. Rickbeil G.J.M., Coops N.C., Adamczewski J. The grazing impacts of four barren ground caribou herds (*Rangifer tarandus groenlandicus*) on their summer ranges: An application of archived remotely sensed vegetation productivity data // *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 164, P. 314-323.

53. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 1973, P. 309-317.

54. Sabia R. SMOS L2 OS Algorithm Theoretical Baseline Document. 2016. SO-TN-ARG-GS-0007. Is. 3.13. ESA/DEIMO. URL: https://earth.esa.int/documents/10174/1854519/SMOS_L2OS-ATBD

55. Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid Systems // *Cartography and Geographic Information Science*, 2003, Vol. 30, Is. 2, P. 121-134.

56. Talone M., Sabia R., Camps A., Vall-Ilossera M., Gabarró C., Font J. Sea surface salinity retrievals from HUT-2D L-band radiometric measurements // *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, Is. 8, P. 1756-1764. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.006>

57. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 56, Is. 8, P. 1578-1589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.009>

58. Trofaier A.M., Westermann S., Bartsch A. Progress in space-borne studies of permafrost for climate science: Towards a multi-ECV approach // *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 203, P. 55-70.

59. Tutubalina O.V., Rees W.G. Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Noril'sk (1961–1999) // *Cold Regions Science and Technology*, 2011, Vol. 32, Is. 2-3, P. 191-203.

60. Umbert M., Hoareau N., Turiel A., Ballabrera-Poy J. New blending algorithm to synergize ocean variables: The case of SMOS sea surface salinity maps // *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 146, P. 172-187. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.018>

61. Wadhams P. The underside of Arctic sea ice imaged by sidescan sonar // *Nature*, 1988, Vol. 333, P. 161-164. DOI:10.1038/333161a0

62. Walker D.A., Raynolds M.K., Danils F.J.A., Einarsson E., Elvebakk A., Gould W.A., Katenin A.E., Kholod S.S., Markon C.J., Melnikov E.S., N.G. M., Talbot S.S., Yurtsev B.A., CAVM Team 2005. The Circumpolar Arctic Vegetation Map. // *Journal of Vegetation Science*, 2005, Vol. 16, Is. 3, P. 267-282. URL: [https://doi:10.1658/1100-9233\(2005\)016](https://doi:10.1658/1100-9233(2005)016).

63. Wan Z. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Background Document (LST ATBD). Washington: National Aeronautics and Space U.S. Department of Commerce, 1999. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf

64. Wigneron J.-P., Schwank M., Baeza E.L., Kerr Y. et al. First evaluation of the simultaneous SMOS and ELBARA-II observations in the

Mediterranean region // Remote Sensing of Environment, 2012, Vol. 124, P. 26-37. URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.014>

65. Wigneron J.-P., Jackson T.J., O'Neill P., De Lannoy G., Kerr Y. Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms // Remote Sensing of Environment, 2017, Vol. 192, P. 238-262.

66. Yin X., Boutin J., Martin N., Spurgeon P., Vergely J.-L., Gaillard F. Errors in SMOS Sea Surface Salinity and their dependency on a priori wind speed // Remote Sensing of Environment, 2014, Vol. 146, P. 159-171. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.008>

67. Zhurbas N.V., Zavialov P.O. Effect of stratification on wind drift of river runoff in the Kara Sea // Oceanology, 2015, Vol. 55, Is. 6, P. 827-831.

68. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011, Т. 8, № 4, С. 285-302.

69. Бордонский Г.С., Орлов А.О., Филиппова Т.Г. Измерения низкочастотной диэлектрической проницаемости увлажненных дисперсных сред при отрицательных температурах // Криосфера Земли, 2008, Т. XII, № 1, С. 66-71. URL: <http://www.izdatgeo.ru>

70. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Чухланцев А.А. Моделирование радиотеплового излучения лесов при спутниковых наблюдениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2005, Т. 5, № 2, С. 256-261.

71. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. Издательство «МИР», Москва 1976, 509 с.

72. Ермохина К.А. Фитоиндикация экзогенных процессов в тундрах центрального Ямала. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук, 25.00.23. Москва, 2009.

73. Жилинская Г.Н. Определение диэлектрической проницаемости земных покровов при наличии растительности методами микроволновой радиометрии // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, 2006, № 98, С. 159-162.

74. Ковалевская Н.М., Романов А.Н., Хворова Л.А., Сысоева Т.Г., Суковатов К.Ю., Шаповалов С.В. Анализ пространственных образов растительного покрова полуострова Ямал на основе данных дистанционного зондирования. Экология Арктики // Научный вестник ЯНАО, 2016, № 4(93), Салехард, С. 43-50.

75. Комаров С.А., Миронов В.Л., Романов А.Н. Аэрокосмическое зондирование гидрологического состояния почв радиофизическими методами. Барнаул: Изд-во АГУ, 1997, 101 с.

76. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. М.: Мир, 1988, 343 с.

77. Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова, 2007.

78. Москаленко Н.Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли, 2009, Т. 13, №4, С. 18-23.

79. Романов А.Н. Влияние объемной влажности и фазового состава воды на диэлектрические свойства древесины в микроволновом диапазоне // Радиотехника и электроника, 2006, Т. 51, № 4, С. 461-466.

80. Сагалович В.Н., Фальков Э.Я., Царева Т.И. Определение влажности почвы и оптической толщины растительного покрова по данным пассивного микроволнового дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса, 2005, №5, С. 44-47.

81. Садовничий В.А. Космическое земледование / Под редакцией В.А. Садовниченко. М.: Изд-во МГУ, 1992, 269 с.

82. Тыртиков А.П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1969, 192 с.

83. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. / Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014, 544 с.

84. <https://earthexplorer.usgs.gov>

85. <https://lpdaac.usgs.gov>

86. <https://landsat.usgs.gov/landsat-8>

87. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

Научное издание

Романов А.Н., Хвостов И.В., Уланов П.Н., Ковалевская Н.М.,
Кириллов В.В., Плуталова Т.Г., Кобелев В.О., Печкин А.С.,
Синицкий А.И., Сысоева Т.Г., Хворова Л.А.

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
АРКТИЧЕСКИХ И СУБАРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ
ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Подписано в печать 02.04.2018

Формат 60 * 84/16. Бумага офсетная, печать офсетная.

Тираж 155 экз. Заказ № 133

Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

Издательство ООО «Пять плюс»
656031, Барнаул, ул. Крупской, 97, оф. 4, 5,
тел.: (3852) 62-85-57,
e-mail: fiveplus07@mail.ru,
www.five-plus.ru