

Морские, речные и озёрные льды

УДК 528.88

Методология спутниковой СВЧ-диагностики широтно-зональной и сезонной изменчивости мёрзлых почвогрунтов и морского льда

© 2013 г. В.В. Мелентьев^{1,2}, И.В. Мателенок¹¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения;²Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург

vv.melentyev@mail.ru

Статья принята к печати 21 ноября 2012 г.

Замерзание/оттаивание, многолетнемёрзлые грунты, радиояркостьная температура, СВЧ-радиометрия, сезонномёрзлые грунты.

Brightness temperatures, freeze/thaw, passive microwave radiometry, permafrost, seasonally frozen grounds.

Рассмотрены метод визуализации СВЧ-излучательных свойств многолетне- и сезонномёрзлых почвогрунтов и льда в пространственно-временных координатах, а также результаты его применения для исследования широтно-зональной, внутри- и межгодовой изменчивости различных объектов суши, морского и пресноводного льда. Планшеты (картосхемы) пространственно-временной изменчивости различных типов подстилающей поверхности Западно-Сибирского региона и акватории Карского моря исследуются на основе данных измерений радиояркостьной температуры на частоте $f = 6,9$ ГГц СВЧ-радиометрического комплекса AMSR-E, установленного на борту ИСЗ «Aqua». Особенности распределения радиояркостьной температуры по широте в разные периоды года соотнесены с границами физико-географических зон. Для тундровой зоны данные спутниковой СВЧ-информации сопоставлены с результатами контактных измерений на площадке геокриологического стационара Марре-Сале.

Введение

Известно, что компоненты природной среды Северной полярной области, в том числе многолетнемёрзлые грунты, морские льды и ледники суши, крайне чувствительны к современным глобальным климатическим изменениям [11]. Так, многолетнемёрзлые грунты, среднегодовая температура которых во многих регионах близка к точке таяния, даже при незначительном потеплении могут переходить в категорию сезонномёрзлых грунтов. При этом активные процессы преобразования природных комплексов, связанные с деградацией мёрзлых грунтов, оказываются опасными как для хозяйственной деятельности, так и для динамической стабильности геосистем. Традиционные инструментальные методы контроля криосферы, основанные на контактных измерениях параметров мёрзлых сред, не позволяют судить об изменчивости её состояния на обширных территориях Северной полярной области. Оптимальными для создания системы оперативного мониторинга за многолетне- и сезонномёрзлыми грунтами, полярными льдами и ледниками суши, согласно развиваемой нами

идеологии, должны стать дистанционные мультиспектральные СВЧ-методы [3, 11]. Неблагоприятные для наблюдения в видимом диапазоне облачность и малая освещённость приполярных районов не препятствуют использованию методов дистанционного радиозондирования земных покровов – пассивной СВЧ-радиометрии и активной радиолокации.

Первые эксперименты по аэрокосмическому картированию земной поверхности в высоких широтах проводились с помощью датчиков видимого и ИК-диапазона [7]. Запущенный в СССР в 1968 г. первый в мире искусственный спутник «Космос-243» с многоканальным радиометрическим СВЧ-комплексом на борту открыл перспективу использования этого вида информации при исследовании излучательных свойств различных типов почвогрунтов в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов и за её пределами. По данным этой СВЧ-миссии сотрудниками Государственного научно-исследовательского центра изучения природных ресурсов (ГосНИЦИПР) была построена, по-видимому, первая в мире СВЧ-карта положения границ областей сплош-

ной и прерывистой мерзлоты [1]. Кроме того, была предложена методика оперативного подсчёта площади дрейфующего льда в Северном Ледовитом и Южном океанах [11]. Запуски измерительной СВЧ-аппаратуры с улучшенным пространственным и временным разрешением, проводившиеся в нашей стране и за рубежом в 1980–2000 гг., сопровождались наземными экспериментами в контролируемых условиях *in situ*, а также модельными теоретическими расчётами излучательной способности сред при отрицательных температурах, направленными на дальнейшее развитие технологий СВЧ-диагностики криосферы [3, 4, 14]. Значительно повысились точность определения сплочённости (*concentration*) льда в Арктическом бассейне и надёжность распознавания возрастных характеристик морского и пресноводного льда [11]. Однако существенная пестрота излучательных СВЧ-свойств подстилающих поверхностей суши так и не позволила вплоть до настоящего времени создать методики однозначного распознавания в те или иные временные промежутки годового цикла изменчивости отдельных характеристик многолетнемёрзлых пород. Крайне малочисленны и работы по климатологическому аспекту использования СВЧ-съёмки, ряды которой насчитывают уже более трёх десятилетий.

В течение двух последних лет как российские, так и зарубежные исследователи пытались решить эти проблемы. Так, например, в работах [13, 14] были предложены методики СВЧ-диагностики таяния грунтов и снежного покрова, использующие спектральный градиент показаний разночастотных каналов СВЧ-радиометров, которые позволили получить картину глобального распределения областей таяния и промерзания. Авторы [8, 9] положили в основу методик восстановления температуры почвогрунтов в полярных и субполярных регионах поляризационные свойства подстилающих поверхностей в СВЧ-диапазоне. Однако, в целом, все имеющиеся на сегодняшний день методики восстановления характеристик почвогрунтов тундровой и бореальной зон имеют региональные ограничения и позволяют выполнять лишь трендовые оценки состояния многолетнемёрзлых пород без учёта всей совокупности факторов, определяющих излучательные СВЧ-свойства подстилающей поверхности. Недавно созданная система мониторинга зоны многолетне- и сезонномёрзлых грунтов с использованием СВЧ-информации (*DUE permafrost*) открыла новые возможности в организации комплексного анализа разнородных данных о состоянии криолитозоны. Вместе с тем небольшое число тестовых полигонов и необходимость дальнейшей оптимизации работы отдельных алгоритмов (в частности, для определения

SMC – влажности грунтовых слоёв) не позволяют считать данную систему универсальным средством мониторинга многолетнемёрзлых пород, пригодным для решения задач спутникового землеведения и спутниковой климатологии.

Цели и задачи

Ещё в конце 1970-х – начале 1980-х годов в ряде наших исследований [3, 4] высказывалась идея, что осреднённые по времени и пространству значения радиояркостной температуры системы «Земля–атмосфера» можно использовать в качестве интегрального климатологического показателя, позволяющего оценивать её климатическую изменчивость. При этом степень «чувствительности» предлагаемого показателя, зависящая от множества разнонаправленных факторов и свойств подстилающей поверхности, изначально подразумевает необходимость широтного районирования исследуемых территорий и морских акваторий Северной полярной области. В работе [12] этот подход был успешно апробирован для Западной Сибири. СВЧ-исследования многолетне- и сезонномёрзлых грунтов выполнялись для трансекта, совпадающего с меридианом 70° в.д. Выбор трансекта был обусловлен разнообразием типов подстилающих поверхностей, а главное – наибольшей для данного региона чувствительностью мёрзлых почвогрунтов к климатическим изменениям [2]. Анализ радиояркостных температур системы «Земля–атмосфера», полученных с помощью СВЧ-радиометров SMMR (ИСЗ «*Nimbus-7*») и SSM/I (ИСЗ серии *DMSP*), позволил выполнить количественную оценку пространственно-временной изменчивости криолитозоны Западной Сибири за 1978–1999 гг., в том числе выявить тенденцию роста средних за зимние месяцы значений радиояркостной температуры в 1992–1999 гг., что, по нашему заключению, могло свидетельствовать о наличии соответствующего тренда развития и самой зоны многолетнемёрзлых пород.

Настоящая работа продолжает исследования, выполненные нами ранее [12], и направлена на дальнейшее развитие методов спутникового СВЧ-зондирования и их использования для оперативного и климатологического картирования многолетне- и сезонномёрзлых грунтов. Основная её цель – разработка новой СВЧ-технологии поляризационного мониторинга мёрзлых почвогрунтов тундровой и бореальной зон Северной полярной области, а также других типов подстилающей поверхности с ассимиляцией дистанционной информации и результатов контактных *in situ* измерений. Важнейшие задачи данного этапа работ – создание методики визуализации радиометрической СВЧ-информации в пространственно-временных координатах и её анализ в рамках концеп-

ции «СВЧ-климатология» [5]. Среди приоритетных задач отметим оценку широтной, сезонной, внутри- и межгодовой изменчивости состояния разных типов подстилающей поверхности, а также типизацию (классификацию) территории Западной Сибири по её «СВЧ-радиопортрету» [12] с последующим сопоставлением её с существующим физико-географическим районированием.

Объект исследований и методика тематической обработки

В рамках настоящей работы проанализированы данные спутникового СВЧ-радиометра AMSR-E ИСЗ «Аква», полученные в 2005–2008 гг. на канале $f = 6,9$ ГГц (горизонтальная и вертикальная поляризации) и позволяющие проводить зондирование большего слоя почвогрунтов по сравнению с датчиками SSM/I и SMMR ($f = 19,0$ ГГц и выше). Рассмотренный к настоящему моменту временной интервал спутниковой съёмки за 2005–2008 гг. охватывает годы, экстремальные по суровости зимнего сезона и среднегодовой температуре в начале XXI в. (2006 г. – холодный; 2007 и 2008 гг. – тёплые). Тестовым полигоном служит тот же меридиан 70° в.д. Данный трансект пересекает Карское море и физико-географические зоны Западно-Сибирской низменности: от тундр п-ова Ямал до степей и лесостепей юга Тюменской области и Северного Казахстана. Вдоль выбранного трансекта расположены области непрерывного, прерывистого и островного распространения многолетнемёрзлых пород, переходящие далее к югу в области сезонного промерзания почвогрунтов.

Этап визуализации первичных СВЧ-данных в пространственно-временных координатах предполагал использование мозаик посуточного распределения радиояркостной температур для $f = 6,9$ ГГц в пределах Северного полушария, хранящихся в архиве Национального центра снега и льда Университета Колорадо (NSIDC), из которых проводился отбор пикселей вдоль трансекта 70° в.д. с последующим сведением их в оперативную базу данных. Пространственное разрешение мозаик – 25 км, заявленная погрешность восстановления радиояркостной температуры по отчётам сканера – 1 К. Кроме того, для отдельных дат проанализированы первичные некалиброванные отчёты сканера AMSR-E (размер мгновенной области обзора IFOV для $f = 6,9$ ГГц – 43×74 км). Материалы измерений *in situ*, использованные для валидации спутниковой информации, содержат метеоданные гидрометеостанций (ГМС), расположенных в Западной Сибири и Казахстане на разной широте, но максимально близко к трансекту 70° в.д. (ГМС Марре-Сале, Салехард, Ханты-Мансийск, Тобольск, Исилькуль, Караганда), а также данные геокриологического ста-

ционара Марре-Сале на западном побережье п-ова Ямал, входящего в сеть мониторинга деятельного слоя CALM. Сведённые в единую базу метеоданные по территории Западной Сибири содержат среднесуточные температуры приземного слоя воздуха, а также информацию о снежном покрове и осадках. Температура грунта $T_{гд}$ на стационаре измеряется на нескольких глубинах (от 0,02 до 2 м) в пределах участка, не подвергнувшегося техногенному воздействию. Участок подстилается песчаными грунтами, а в его растительном покрове преобладают мхи. В исследовании использовались данные измерений температуры грунта на глубине 2 и 5 см.

Дальнейшая обработка сформированного оперативного массива СВЧ-данных предусматривала выделение широтных и временных профилей радиояркостной температуры, а также составление комбинированных спутниковых планшетов (картосхем) её пространственно-временной изменчивости. При исследовании профилей изменчивости радиояркостной температуры по трансекту во времени проводилась классификация территории вдоль меридиана 70° в.д. Для разных широтных зон были выделены временные интервалы (сезоны), которым соответствуют характерные отличительные особенности распределения радиофизических, а следовательно, физико-химических, физико-механических и термодинамических свойств подстилающих поверхностей (температуры, влажности и др.). Выделенные районы с относительно однородным внутригодовым поведением радиояркостной температуры сопоставлялись с существующим физико-географическим районированием. При этом для каждого такого района был разработан типовой радиопортрет и определён характер его изменений в пределах годового цикла. Анализ базируется на средних каждодневных значениях радиояркостной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Для определения степени корреляции между рядами СВЧ-данных и контактными измерениями выполнен анализ информации *in situ*.

Пространственно-временная изменчивость свойств многолетне- и сезонномёрзлых пород Западной Сибири и ледяного покрова Карского моря

В качестве примера, иллюстрирующего возможности метода дистанционной СВЧ-диагностики разных типов подстилающей поверхности, на рис. 1 представлены данные о внутригодовой пространственно-временной изменчивости радиояркостной температуры на горизонтальной поляризации вдоль трансекта 70° в.д. за первую половину календарного 2008 г. Выбор горизонтальной поляризации H для визуализации изменчивости радиояркостной температуры обусловлен выявленными в ходе данного

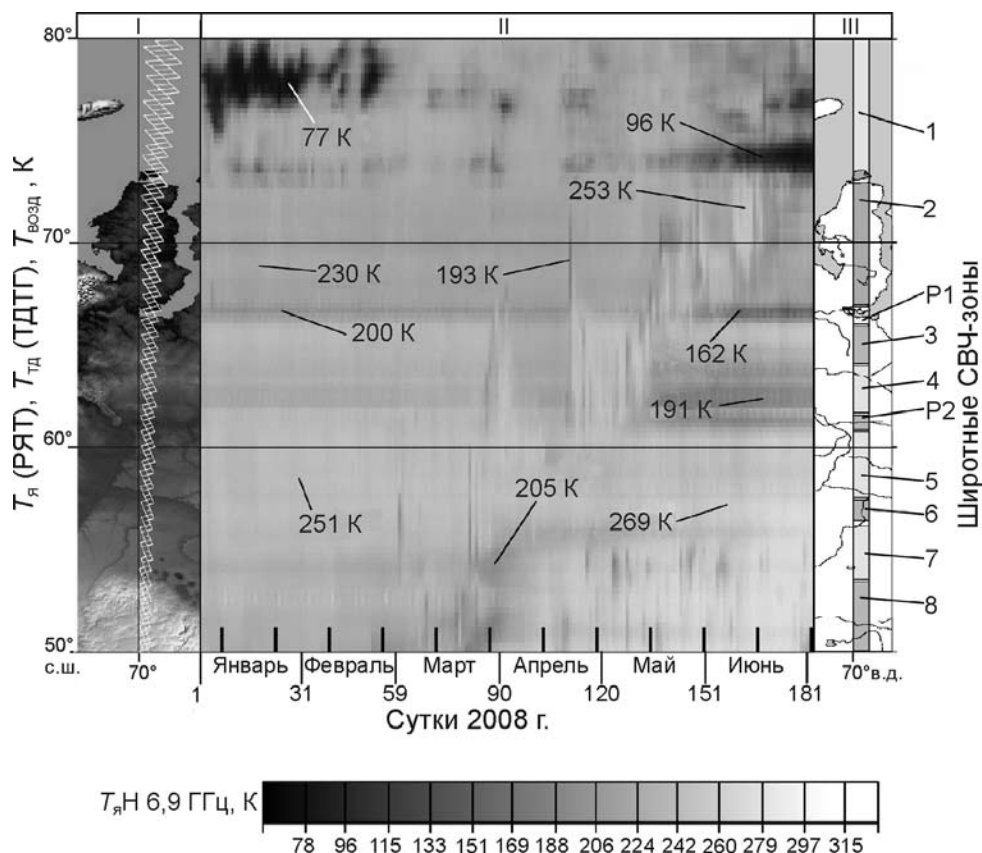


Рис. 1. Пространственно-временная изменчивость радиояркостной температуры системы «Земля–атмосфера» вдоль трансекта 70° в.д., 2008 г., ИСЗ «Aqua», AMSR-E, $f=6,9$ ГГц, H -поляризация:

I – географическое положение исследуемого трансекта; II – планшет пространственно-временного распределения РЯТ; III – результаты спутниковой СВЧ-широтно-зональной дифференциации природных зон 1–8, P1 и P2 (см. табл. 1)

Fig. 1. Spatial-temporal variations of the brightness temperatures (T_{br}) along the transect 70° E (2008, satellite «Aqua», AMSR-E, $f=6.9$ GHz, H -polarization):

I – geographic location of the investigated transect; II – map of the spatial-temporal distribution of T_{br} ; III – proposed latitudinal zoning of the Western Siberia; description of latitudinal microwave zones 1–8, P1, P2 is presented in Table 1

исследования большими значениями фиксируемых контрастов температуры по сравнению с каналом вертикальной поляризации V . Для количественной оценки изменчивости излучательных СВЧ-свойств подстилающих поверхностей использовались оба поляризационных канала.

В конечном итоге, по спутниковым микроволновым данным вдоль трансекта 70° в.д. мы идентифицировали восемь широтных СВЧ-зон, отличающихся характерными особенностями внутригодовой изменчивости радиояркостной температуры, а в её годовом цикле выделено четыре основных периода (сезона), более или менее выраженных в разных широтных зонах. Сведения о типизации всех выделенных СВЧ-зон приводятся в табл. 1. За основные определяющие показатели для разбивки трансекта на участки по широте взяты значения радиояркостной температуры на V - и H -поляризации, усреднённые за год и за отдельные внутригодовые временные интервалы, а также коэффициент поляризации P и среднеквадратичное отклонение (СКО) (табл. 2).

При анализе внутригодовой изменчивости радиояркостной температуры для каждой широтной зоны выделены типичные внутригодовые профили её изменчивости и профили, отличающиеся от типичных. Подсчёт площади, занимаемой вдоль трансекта водными объектами (открытая вода и участки, покрытые льдом)

в пределах элементов разрешения СВЧ-радиометра в разные периоды года, показал, что наличие нетипичных профилей на отдельных участках разных зон континентальной части трансекта связано с большой долей площади, занимаемой водными объектами в пределах соответствующих пикселей.

Далее мы приводим результаты анализа спутниковых измерений и измерений *in situ*, которые относятся к тундровой, лесотундровой и таёжной зонам Западной Сибири (широтные СВЧ-зоны 2–5), охватывающим области распространения многолетне- и сезонномёрзлых грунтов вдоль трансекта 70° в.д.

Так, выделенная нами по данным ИСЗ широтная СВЧ-зона № 1 трансекта 70° в.д. покрывает значительную часть акватории Карского моря. При этом, как следует из рис. 1, существенная разница излучательной способности воды и морского льда в СВЧ-диапазоне создаёт условия для диагностики процессов лёдообразования, фиксации моментов появления участков открытой воды и изменения ледовых условий [3, 5, 11]. В зимние и весенние месяцы с помощью спутниковой СВЧ-съемки нам удалось чётко определить периодически возникающие области пониженных радиояркостных температур, которые располагаются к северу от о. Белый на широтах 73,5–74° с.ш. и вблизи мыса Желания (76–79° с.ш.). Согласно нашему многолетнему опыту работы в

Таблица 1. Результаты спутниковой СВЧ-широтной-зональной дифференциации природных зон Западной Сибири и Северного Казахстана, выделяемые вдоль трансекта 70° в.д. по данным съёмки ИСЗ «Аqua» в 2005–2008 гг., AMSR-E, $f = 6,9$ ГГц*

Природные зоны, определяемые спутниковой СВЧ-съёмкой	Границы зон, с.ш.	Физико-географические области	Типы грунтов [2]	Растительность	РЯТ (I) (среднее для каждой из зон), К	РЯТ (H) (среднее для каждой из зон), К	Коэффициент поляризации P (среднее для каждой из зон), %
№ 1	73,5–80,0°	Карское море	—	—	212,3	161,9	13,5
№ 2	67,0–73,5°	Тундровые сибирские	ММГ	Арктические, северные, кустарниковые тундры	252,2	224,5	5,8
№ 3	64,0–65,9°	Лесотундровые и таёжные	ММГ и СМГ	Лиственничные редколесья, лиственнично-еловые и лиственнично-сосновые леса	260,0	240,7	3,9
№ 4	61,8–64,0°	Таёжные	ММГ и СМГ (преобладание СМГ)	Травяные болота, сфагновые верховые болота	248,0	221,3	5,7
№ 5	57,5–60,6°			Тёмнохвойные леса (кедрово-елово-пихтовые)	263,2	251,3	2,3
№ 6	56,5–57,5°		СМГ	Осиново-берёзовые леса	266,5	256,3	2,0
№ 7	53,5–56,0°			Лесостепи	268,6	247,2	4,1
№ 8	50,0–53,5°	Степные		Разнотравные степи, сухие степи	272,6	246,6	5,0
P1	66,0–66,9°	Водотоки (пойма р. Обь)	—	—	240,0	208,4	7,0
P2	60,7–61,7°				257,6	238,3	3,9

*РЯТ – радиояркая температура; ММГ – многолетнемёрзлые грунты; СМГ – сезонномёрзлые грунты.

морях арктического бассейна, они соответствуют времени образования здесь квазистационарных полей и их пространственным размерам [3, 11].

Участок № 2 спутникового трансекта относится к тундровой зоне, южная граница которой совпадает с границей области непрерывного распространения многолетнемёрзлых пород. Для данной зоны внутри годового цикла чётко выделяются четыре периода, отличающихся своеобразием изменчивости радиояркой температуры, которое характеризует состояние подстилающей поверхности (рис. 2): А – период стабильно мёрзлого состояния почвогрунтов и снежного покрова; В – период циклического повторения процессов оттаивания–замерзания; С – летний, или вегетационный, период; D – осенний период промерзания грунтовых слоёв. Сопоставление метеоинформации с данными СВЧ-зондирования показывает, что наиболее значимое снижение радиояркой температуры в период В происходит в дни, когда на повышение температуры воздуха накладывается выпадение осадков в виде дождя и мокрого снега, вызывающих таяние снежного покрова или даже появление влаги на поверхности грунта [5].

На основании результатов экспериментальных исследований температурных зависимостей диэлектрических свойств грунтов и натурных измерений СВЧ-излучательной способности поверхностей разных типов в работе [10] было установлено, что при температурах ниже -10 °С коэффициенты излучения мёрзлых грунтов ϵ практически не зависят от температуры грунта $T_{\text{гд}}$ (особенно это характерно для песчаных грунтов). Отсюда мы делаем принципиальный методологический вывод, что фиксируемые по данным AMSR-E в зимний период в тундровой части трансекта температуры воздуха $T_{\text{возд}}$ и грунта $T_{\text{гд}}$ соответствуют условиям, при которых можно считать коэффициенты ϵ поверхностных грунтовых слоёв постоянными, а радиояркую температуру системы «грунт–снег» – прямо пропорциональной усреднённой температуре излучающего слоя. Так, в 2005–2008 гг. колебания $T_{\text{гд}}$ в январе–марте происходили в интервале 240–265 К.

В летний период В в системе «грунт–растительность» при развитом растительном слое величина ϵ изменяется незначительно (за исключением случаев особо интенсивных осадков), что позволяет нам условно считать связь между радиояркой темпе-

Таблица 2. Внутригодовая изменчивость радиояростной температуры системы «Земля–атмосфера», осреднённой для различных природных зон, определяемых спутниковой СВЧ-съёмкой на $f = 6,9$ ГГц в 2007 г., за периоды А–D, и их корреляция с результатами измерений *in situ* – термодинамической температурой грунта (ТДТГ) на глубине 0,02 м $T_{гд}$ и температурой приземного воздуха $T_{возд}$ *

Природные зоны, определяемые спутниковой СВЧ-съёмкой	Периоды характерного состояния мёрзлых почвогрунтов, 2007 г.	РЯТ (I) (среднее для каждого из периодов), К	РЯТ (H) (среднее для каждого из периодов), К	Коэффициент корреляции между		Среднеквадратичное отклонение РЯТ (I) (для каждого из периодов), К	Коэффициент поляризации P (среднее для каждого из периодов), %
				РЯТ (I) и ТДТГ	РЯТ (I) и $T_{возд}$		
№ 1	A	239,8	207,2	–		21,5	7,3
	B	211,3	158,9			28,9	14,2
	C	159,7	79,4			3,3	33,6
	D	222,7	176,3			31,9	11,6
№ 2	A	252,5	224,9	0,97	0,82	4,4	5,8
	B	257,7	224,6	0,60	0,47	6,1	6,9
	C	251,3	223,0	0,79	0,58	7,2	6,0
	D	249,9	224,7	0,23	0,21	5,7	5,3
№ 3	A	256,4	224,3	–	0,7	2,8	6,7
	B	260,9	235,9			4,2	5,0
	C	264,2	247,1			8,5	3,3
	D	255,5	242,4			3,3	2,6
№ 4	A	249,7	224,2	–		3,5	5,4
	B	256,3	226,3			7,3	6,2
	C	244,8	210,7			9,3	7,5
	D	243,0	223,4			6,1	4,2
№ 5	A	256,8	245,2	–	0,91	3,3	2,3
	B	260,0	244,4			4,2	3,1
	C	269,7	254,9			7,5	2,8
	D	258,3	249,1			3,9	1,8
№ 6	A	258,9	244,2	–		1,9	2,9
	B	259,9	242,7			6,0	3,4
	C	273,2	262,1			9,6	2,1
	D	260,6	253,8			4,5	1,3
№ 7	A	259,8	233,3	–	0,51	2,4	5,4
	B	262,5	236,0			5,5	5,3
	C	273,9	249,4			14,5	4,7
	D	262,1	244,8			4,5	3,4
№ 8	A	260,3	230,7	–	0,78	2,2	6,0
	B	262,4	231,0			4,0	6,4
	C	282,7	256,5			13,6	4,9
	D	264,0	241,4			5,7	4,5
P1	A	247,2	214,1	–		7,5	7,2
	B	250,5	219,0			12,0	6,7
	C	232,4	192,8			10,6	9,3
	D	233,7	207,1			8,7	6,0
P2	A	255,0	233,6	–		3,2	4,4
	B	257,5	232,1			7,0	5,2
	C	242,8	208,7			11,6	7,6
	D	256,0	237,4			6,5	3,8

*РЯТ – радиояростная температура.

ратурой и термодинамической температурой линейной. Возмущения в данную линейную зависимость могут вносить, прежде всего, изменения свойств границ слоёв системы «грунт–снег (раститель-

ность)–воздух». Максимальная корреляция между результатами *in situ* измерений $T_{гд}$ с площадки стационара Марре-Сале и радиояростной температуры тундрового участка на п-ове Ямал наблюдается в

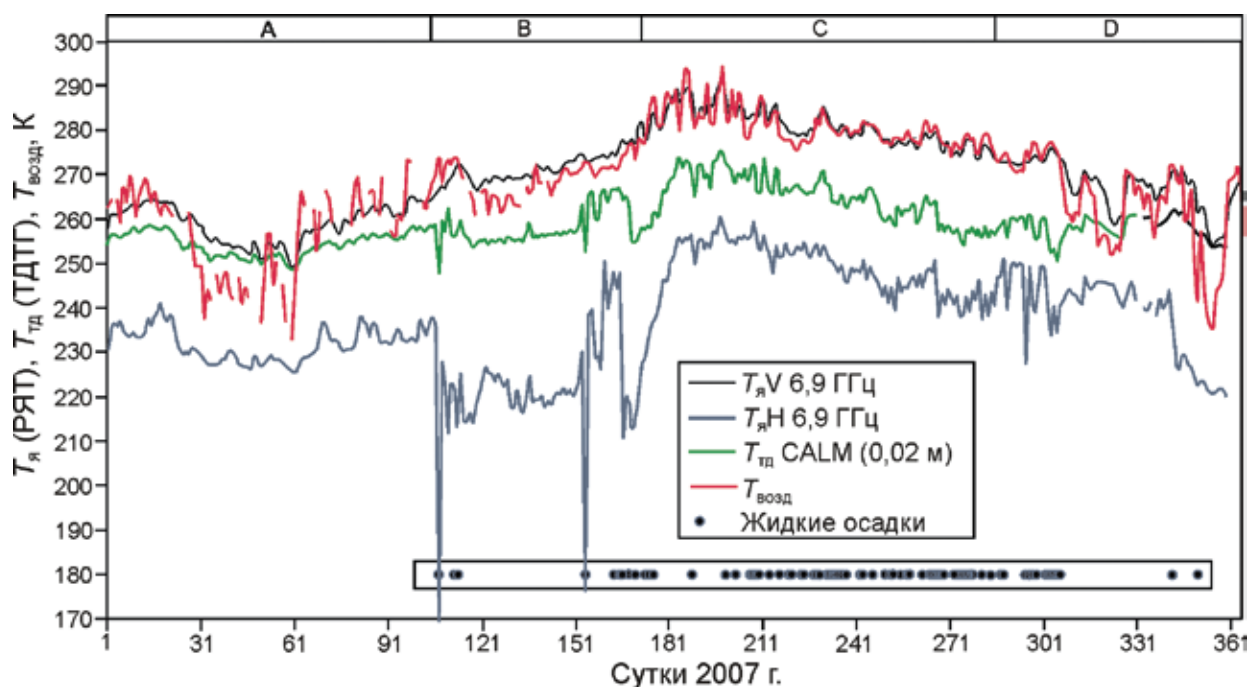


Рис. 2. Годовой ход радиояркостной температуры для участка размером 25 × 25 км тундровой зоны № 1 п-ова Ямал (2007 г., ИСЗ «Aqua», AMSR-E, $f = 6,9$ ГГц, V - и H -поляризация); $T_{\text{возд}}$ (ГМС Марре-Сале); $T_{\text{г}}$ грунта (геокриологический стационар Марре-Сале).

Точки – даты выпадения жидких осадков (ГМС Марре-Сале); А–D – периоды характерного состояния мёрзлых почвогрунтов для участка тундры, восстановленные по данным спутниковой СВЧ-съёмки вдоль трансекта 70° в.д.: А – период стабильно мёрзлого состояния грунтов и снежного покрова; В – весенне-летние циклы «оттаивание–замерзание»; С – вегетационный период; D – осенний период промерзания грунтов

Fig. 2. T_{br} annual variability: for the 25×25 km tundra site № 1 at the Yamal Peninsula (2007, satellite Aqua, AMSR-E, $f = 6,9$ GHz, V - and H -polarization – $T_{яV}$ и $T_{яH}$ correspondingly); T_{air} (HMS Marre-Sale); T_{gr} temperature (Marre-Sale geocryologic station). Points – liquid precipitation (HMS Marre-Sale); A–D – periods of specific ground state inside the annual T_{br} course retrieved from the passive microwave survey along the transect 70° E: A – season of stable frozen ground and snow conditions; B – season of cyclic thawing–freezing (spring–summer); C – vegetation season; D – fall season of ground freezing

периоды А и С (табл. 3). В периоды В и С, напротив, рассматриваемые параметры практически не коррелируют друг с другом.

Таким образом, отсюда следует вывод, что для восстановления значений термодинамической температуры почвогрунтов в периоды А и С можно использовать одноканальные СВЧ-измерения и простые модели линейной регрессии (рис. 3). В периоды весенних и осенних циклов многократного оттаивания–промерзания, когда содержание жидкой влаги в почвогрунтах (а, следовательно, и их коэффициент излучения ϵ) может сильно варьировать даже день ото дня, использование линейной регрессии для восстановления значений термодинамической температуры по отсчётам радиояркостной температуры в этих случаях малоэффективно (достоверность аппроксимации не превышает $R^2 = 0,01 \div 0,35$).

Участки темнохвойной (кедрово-елово-пихтовой) тайги, соответствующие СВЧ-зоне № 5 трансекта, отличаются максимально высокими на протяжении всего годового цикла значениями радио-

Таблица 3. Коэффициент корреляции между термодинамической температурой грунта $T_{г}$, температурой воздуха $T_{возд}$ (Марре-Сале) и радиояркостной температурой (РЯТ), измеренной на $f = 6,9$ ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации в периоды А и В 2007 г., характерные для тундровой зоны № 1 (п-ов Ямал)

	$T_{г}$, К	$T_{возд}$, К	РЯТ (V), К	РЯТ (H), К
<i>2007 г., период А</i>				
$T_{г}$, К	1	0,83	0,97	0,86
$T_{возд}$, К		1	0,81	0,75
<i>2007 г., период В</i>				
$T_{г}$, К	1	0,72	0,48	–0,15
$T_{возд}$, К		1	0,44	–0,18

яркостной температуры. По нашему мнению, это связано с круглогодичным присутствием хвойного покрова. Даже в период интенсивного весеннего таяния фиксируемые здесь радиояркостной температуры значимо не снижаются. Из этого следует

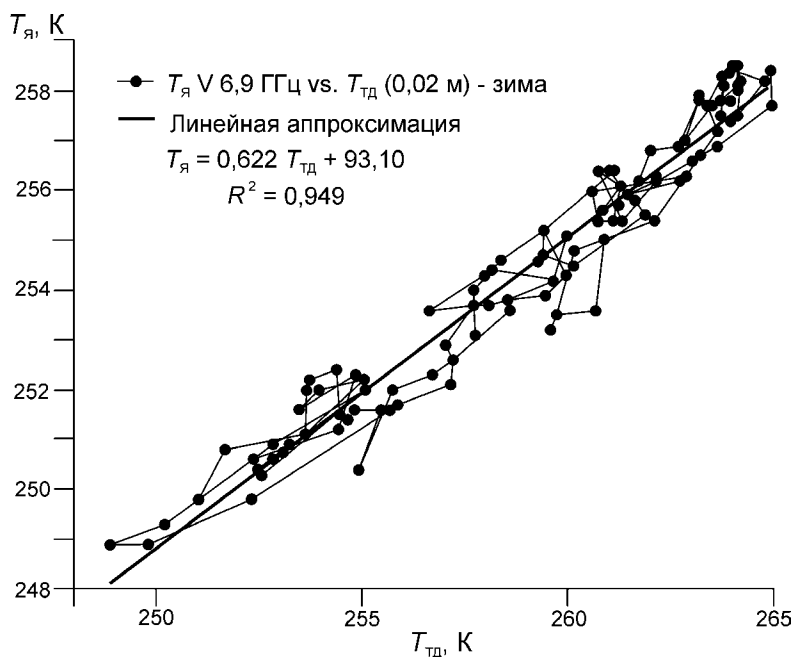


Рис. 3. Результаты сопоставления данных СВЧ-съемки (ИСЗ «Aqua», AMSR-E, $f = 6,9 \text{ GHz}$, V -поляризация) и *in situ* измерений $T_{гр}$ на стационаре Марре-Сале в период стабильно мёрзлого состояния мёрзлого грунта (01.01–15.04 2007 г. – период А)
Fig. 3. Results of comparison of satellite and *in situ* measurements: T_{br} (satellite «Aqua», AMSR-E, $f = 6.9 \text{ GHz}$, V -polarization) vs. measured T_{gr} temperature (geocryologic station Marre-Sale), 01 January till 15 April 2007 (period A)

важный методологический вывод: часть спутникового трансекта, занятую темнохвойными лесами, можно круглогодично использовать в качестве «чёрного тела» для дальнейшего развития и совершенствования метода «внешней» калибровки спутниковой СВЧ-аппаратуры, широко использовавшегося нами при выполнении СВЧ-съемки на борту самолёта-лаборатории ГГО Ил-18 [3].

В пределах СВЧ-зоны № 3 чётко прослеживается значительный контраст между весенними и летними значениями радиояростной температуры. Доминирующий вид древесных пород на указанном участке трансекта – лиственница. В работах [6, 9] отмечается ведущая роль крон деревьев в формировании суммарного СВЧ-излучения многослойной среды почвогрунт–травяная растительность–лес–атмосфера. Поскольку лиственница сбрасывает хвою на зиму, то в весенний период её хвойный покров не участвует в формировании СВЧ-излучения этой многослойной структуры, что вызывает снижение её экранирующего влияния, позволяя в итоге фиксировать весенние «провалы» радиояростной температуры, обусловленные процессами таяния снежного покрова и СМГ, а также выпадением осадков. В летний же период развитые кроны со зрелой хвоей обеспечивают высокие значения радиояростной температуры, не позволяя картировать изменения в состоянии почвогрунтов при рассматриваемой частоте зондирования. Указанные территории вдоль

трансекта мы рекомендуем использовать в качестве «чёрного тела» для калибровки СВЧ-аппаратуры лишь в летний период.

СВЧ-зона № 4 трансекта 70° в.д., обнаруживаемая по контрасту её излучательных свойств с соседней областью № 3, соответствует болотистым таёжным районам Западной Сибири. В весенние месяцы для данной широтной зоны СВЧ-съемкой чётко фиксируются периоды таяния снежного покрова и оттаивания почвогрунтов. Основное отличие этих районов от смежных широтных областей – изменчивость радиояростной температуры в летний период, когда полностью открыто водное зеркало каждого озера, а почвогрунты насыщены влагой. В это время года измеренные значения радиояростной температуры указанного района лежат в пределах $195\text{--}210 \text{ K}$. Радиотепловые сигнатуры, близкие к сигнатурам заболоченных областей, имеют зоны пересечения меридианом 70° в.д. р. Обь – на рис. 2 они соответствуют широтным зонам P1 и P2.

Анализ данных спутниковой СВЧ-радиометрии показывает, что во всех исследованных широтных зонах Западной Сибири существует чётко выраженный промежуток времени, в течение которого одновременно выполняется условие максимума излучательной способности подстилающей поверхности ϵ , вызванное преимущественно мёрзлым состоянием почвогрунтов и снежного покрова и максимальной близостью её термодинамической температуры к

Таблица 4. Результаты сравнения средних измеренных и расчётных радиоярких температур (РЯТ) на $f = 6,9$ ГГц для вертикальной и горизонтальной поляризации тундровой зоны № 1 (п-ов Ямал), осреднённых за различные периоды 2007 г.

Периоды характерного состояния мёрзлых почвогрунтов	Временные границы, сутки	РЯТ (V), К	РЯТ (H), К
A	1–90	252,8*/254,0	232,5*/231,5
B	91–170	258,5/257,9	221,9/224,5
C	171–280	263,9/265,0	247,2/248,5
D	281–365	254,9/257,9	231,8/238,0

*В числителе – расчётные, в знаменателе – измеренные.

0 °С. Но, поскольку радиояркая температура системы «Земля–атмосфера» есть произведение ϵ и $T_{\text{тл}}$, фиксируемые ИСЗ радиояркие температуры должны иметь повышенные значения по отношению к другим, в том числе и к соседним временным интервалам. Данная особенность годового хода радиояркой температуры прослеживается и на рис. 1, где такой подобный интервал повышенных значений температуры относительно среднего зимнего уровня хорошо виден вплоть до некоторой фиксированной отметки времени, после которой следует затяжное падение радиояркой температуры в результате таяния. Этот вывод подтверждается и данными наших модельных расчётов [3, 5], позволяющих выявить наличие тренда усреднённых расчётных значений излучательной способности многослойных сред в весенний период (табл. 4). Таким образом, выполнив по данным ИСЗ процедуру маркировки границ и протяжённости этого интервала в пространственно-временных координатах, мы можем получить важнейшую СВЧ-климатологическую характеристику того или иного исследуемого региона, которую мы называем «интервалом максимальной температуры мёрзлого состояния ландшафтов». Более того, по протяжённости данного участка на планшете можно производить интегральную оценку степени теплообеспеченности почвогрунтов на той или иной широте, а по сдвигу местоположения во времени – судить о степени суровости зимы на той или иной широте и интенсивности теплопереноса в весенний период рассматриваемого года.

Выводы и заключение

Предложенная методология визуализации пространственно-временной изменчивости радиояркой температуры позволяет существенно продвинуться в создании технологии всепогодной дистанционной диагностики различных типов подстилающей поверхности, в том числе сезонно- и многолетнемёрз-

лых почвогрунтов. Благодаря наглядности представления данных спутниковых измерений, можно не только фиксировать их состояние, но и выполнять СВЧ-районирование территорий. Как показывает анализ данных 2005–2008 гг., каждая из изученных природных зон Западной Сибири имеет свой собственный СВЧ-радиопортрет, отличающийся характерными особенностями пространственной и сезонной изменчивости радиояркой температуры, проявляющимися в том числе и на уровне конкретных статистических параметров её распределения (см. табл. 2). Сопоставление планшетов спутниковой СВЧ-съёмки вдоль меридиана 70° в.д. и существующего физико-географического районирования Западной Сибири позволяет сделать вывод, что технологии СВЧ-зондирования дают возможность определения границ восьми природных зон, а также могут быть пригодны для выделения характерных водных объектов, расположенных в пределах этих зон. Данный вывод требует дальнейших исследований с привлечением мультиспектральной спутниковой информации высокого разрешения. Особенно полезным будет использование РСА-изображений. При этом «интервал максимальной температуры мёрзлого состояния ландшафтов», предложенный нами для описания изменчивости радиояркой температуры в пространственно-временных координатах и представляющий собой, по нашему мнению, индикатор динамики региональных процессов теплопереноса, можно использовать для дальнейшего развития концепции спутниковой СВЧ-климатологии.

Сопоставление данных спутникового зондирования с результатами измерений на метеостанциях позволило обнаружить связь между значениями радиояркой температуры, осреднёнными за некоторые ограниченные отрезки времени, и ходом температуры приземного воздуха $T_{\text{возд}}$ на большинстве отрезков годового хода. Анализ радиояркой температуры тундровых участков в окрестностях ГМС Марре-Сале и температуры грунта $T_{\text{тл}}$ на площадке стационара Марре-Сале за 2005–2008 гг. показал, что в дни интенсивного оттаивания почвогрунтов фиксируется существенное снижение радиояркой температуры на частоте $f = 6,9$ ГГц. Это подтверждает возможность определения мёрзлого/талого состояния почвогрунтов тундровой зоны по данным одноканальных СВЧ-измерений. Дальнейшее развитие метода СВЧ-диагностики мёрзлых почвогрунтов предполагает использование измерительных датчиков с более высоким пространственным разрешением, что позволит уменьшить влияние пространственных неоднородностей состояния земных покровов и повысить точность восстановления параметров их состояния.

Литература

1. *Белич В.В., Пенязь Л.А., Горелик А.Г., Марцинкевич Л.М., Семилетов В.И.* Использование спутниковых микроволновых данных для восстановления параметров земной поверхности // Космическая геофизика: Материалы Всес. семинара по методам интерпретации спутниковой инф. о гидрометеорологических параметрах природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. С. 10–15.
2. *Ершов Э.Д.* Геоэкология СССР. Западная Сибирь. М.: Недра, 1989. 454 с.
3. *Кондратьев К.Я., Мелентьев В.В., Назаркин В.А.* Дистанционная индикация акваторий и водосборов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 248 с.
4. *Мелентьев В.В., Рабинович Ю.И.* Излучательная способность естественных поверхностей в микроволновом диапазоне // Тр. ГГО. 1976. Вып. 371. С. 12–21.
5. *Мелентьев В.В., Мателенок И.В.* Изменчивость состояния мерзлых почвогрунтов и других типов подстилающей поверхности Западной Сибири в пространственно-временных координатах: данные спутниковой СВЧ диагностики // Тр. II Всерос. науч. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»: Т. 2. СПб.: изд. ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. С. 249–257.
6. *Мильшин А.А., Гранков А.Г., Шелобанова Н.К.* Исследование сезонной динамики характеристик излучения системы поверхность–лес–атмосфера в СВЧ-диапазоне // Препринт № 3 (624). М.: ИРЭ РАН, 1998. 62 с.
7. *Петропавловская М.С.* Дистанционные методы изучения криолитозоны (на примере Якутии). Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 69 с.
8. *Fily M., Royer A., Goita K., Prigent C.* A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-Arctic areas // Remote Sens. Environ. 2003. V. 83. № 3. P. 328–338.
9. *Jones L.A., Kimball J.S., McDonald K.C., Chan S.K., Njoku E.G., Oechel W.C.* Satellite microwave remote sensing of boreal and arctic soil temperatures from AMSR-E // Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45. № 7. P. 2004–2018.
10. *Komarov S.A., Mironov V.L., Romanov A.N.* Remote sensing methods of frozen soils in VHF Range // Proc. of Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'93). Tokyo, 1993. P. 1988–1990.
11. *Kondratyev K.Ya., Johannessen O.M., Melentyev V.V.* High latitude climate and remote sensing // John Wiley-Praxis Series in Remote Sensing. Chichester: PRAXIS Publishing Ltd, 1996. 200 p.
12. *Melentyev V.V., Johannessen O.M., Bobylev L.P.* Siberian permafrost and seasonally frozen grounds: parameters retrieval using microwave satellite data // Исследование Земли из космоса. 2005. № 5. С. 1–7.
13. *Zhang T., Armstrong R.L.* Soil freeze/thaw cycles over snowfree land detected by passive microwave remote sensing // Geophys. Research Letters. 2001. V. 28. № 5. P. 763–766.
14. *Zuerndorfer B.W., England A.W., Dobson M.C., Ulaby F.T.* Mapping freeze/thaw boundaries with SMMR data // Agric. For. Meteorol. 1990. V. 52. P. 199–225.

Summary

In the frame of the work we have had investigated the utility of 6.9 GHz dual polarization passive microwave data from the sensor AMSR-E for quantitative assessment of spatial and temporal variations of permafrost, seasonally frozen grounds and sea ice properties along the transect 70° E in 2005–2008 years. Analysis of the factors which could be detected with using study of the spatial-temporal variations of the microwave emissivity (brightness temperatures) of the system «Earth–atmosphere» was carried out with using *in situ* data obtained from meteorological stations situated along the investigated transect of the Western Siberia and geocryologic station Marre-Sale (Yamal Peninsula). A new method of visualization of the brightness temperatures in spatial-temporal dimensions was suggested and practical applied. Eight latitudinal zones with intrinsic peculiarities of the spatial and seasonal variability of the brightness temperatures were revealed and investigated in many details. Comparison of the location of these zones with geographic distribution of biomes in Western Siberia was provided and it shows that satellite passive microwave information can be used for classification of the territories inside biomes. In frame of this study the annual brightness temperatures course for tundra zone area has been strictly divided into four periods (seasons) characterized by different types of microwave emissivity variations. For boreal needle-leaved forest zone these seasons are manifested weaker. Comprehensive analysis of the satellite microwave survey data and corresponding the *in situ* data has shown satisfactory correlation between the brightness temperatures of the tundra areas on the Yamal Peninsula and their thermodynamic ground-trough temperatures at the square of geocryologic station Marre-Sale during winter period of stable frozen conditions and vegetation period. In these periods one-channel satellite microwave survey could be applied for the retrieving ground temperatures with using linear regression models.