

Первое применение отечественного спутника «Метеор-М» № 2 для дистанционного зондирования влажности и температуры тундровой почвы

К.В. Музалевский¹, З. Ружичка¹, И.В. Савин¹, М.Г. Захватов², В.В. Гончаров³
А.Х. Сариев³, А.Ю. Каравайский¹

¹Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ
СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru

²Сибирский Центр НИЦ «Планета», Новосибирск, 630099, Россия

³Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики
Норильск, 663302, Россия

В данной работе представлены результаты дистанционного зондирования температуры и влажности талого тундрового почвенного покрова на двух тестовых участках п-ова Таймыр с использованием поляриметрических наблюдений радиояркостной температуры на частоте 10,7 ГГц радиометром МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» № 2. Расположение пикселя зондирования радиометра МТВЗА-ГЯ было выбрано в районе г. Норильска и села Хатанга на п-ове Таймыр. Исследование охватывает период с 1 января по 31 декабря 2015 г. Метод восстановления температуры и влажности почвы основан на решении обратной задачи минимизацией нормы невязки между наблюдаемыми и рассчитанными значениями радиояркостной температуры. Расчет радиояркостной температуры проведен с использованием полуэмпирической модели радиотеплового излучения, параметры которой были предварительно откалиброваны на тестовых участках в районе г. Норильска и села Хатанга, а также модели комплексной диэлектрической проницаемости почвы с высоким содержанием органического вещества. Модель комплексной диэлектрической проницаемости почвенного покрова была создана в лабораторных условиях с использованием методов диэлектрической спектроскопии почвенных образцов, отобранных на тестовом участке в районе г. Норильска. Среднеквадратическое отклонение между восстановленными и измеренными значениями температуры и влажности почвы оказались не более 6,5 °С и 0,06 см³/см³ соответственно. Полученный результат указывает на перспективность использования поляриметрических наблюдений радиояркостной температуры на частоте 10,7 ГГц радиометром МТВЗА-ГЯ отечественного спутника «Метеор-М» № 2 для измерения температуры и влажности арктической тундровой почвы.

Ключевые слова: «Метеор-М», микроволновая радиометрия, модель микроволнового излучения почв, температура почвы, влажность почвы, арктическая зона

Одобрена к печати: 29.08.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-100-118

Введение

Из официального отчета Всемирной метеорологической организации (ВМО) о состоянии климата в 2015 г. следует (WMO..., 2016), что в результате многолетней тенденции увеличения глобальной температуры средняя температура приземного воздуха в 2015 г. превысила аналогичный показатель за 1961–1990 гг. на 0,76 °С и 2,16 °С по всему земному шару и на территории России соответственно. При этом рекордные температурные аномалии от трех до пяти градусов Цельсия наблюдались на севере Сибири, включая п-ов Таймыр Красноярского края ((WMO..., 2016), см. рис. 2 в данном отчете). Долговременные тренды потепления в арктическом регионе индуцируют аномальные потоки тепла вглубь грунтов, что может приводить к сезонному оттаиванию вечной мерзлоты с неконтролируемым высвобождением в атмосферу больших объемов парниковых газов, к оседанию и нарушению несущей способности грунтов, к ухудшению качества водных ресурсов в процессе эрозии грунтов и т.д. Вследствие чего будут перманентно возрастать риски возникновения экстремальных природных

явлений и связанных с ними опасных техногенных аварий на территории Арктической зоны РФ. В связи с этим актуальным является совершенствование, разработка и внедрение современных технологий и методов наблюдения и прогнозирования климатических изменений арктической экосистемы в условиях меняющегося климата, основанных на использовании объективных и измеряемых физических параметров окружающей среды.

Температура и влажность поверхности почвы являются ключевыми параметрами-индикаторами, которые характеризуют интегральное воздействие антропогенных, техногенных и естественных факторов на арктическую экосистему и входят в пятьдесят основных климатических переменных, рекомендованных ВМО для наблюдения (Status..., 2015). В северных регионах планеты (на территориях России, США, Канады и др.) измерение температуры и влажности почвы ведется с помощью пространственно-распределенной сильно разреженной сети метеорологических станций. Малое количество подобных метеорологических станций сильно ограничивает возможности мониторинга изменения климата и не обеспечивает необходимым количеством входных данных климатические модели как регионального, так и глобального масштабов (Status..., 2015; Оценочный..., 2008). Современные спутники дистанционного зондирования, движущиеся по близким к полярной орбитам, способны до нескольких раз в день наблюдать обширные арктические территории с высоким пространственным разрешением и являются альтернативным источником данных о влажности и температуре почвы, дополняя наземные измерения пространственно-распределенной сильно разреженной сети метеорологических станций.

Широкое распространение и обоснование получил метод измерения температуры поверхности почвы с помощью спутниковых инфракрасных (ИК) радиометров. Имеются прошедшие валидацию информационные продукты спутникового дистанционного зондирования температуры поверхности почвы: MODIS LST, Landsat (Thematic Mapper channel 6) и др. Однако применение спутниковых ИК-радиометров для измерения температуры почвы в арктическом регионе имеет ряд ограничений: 1) измеряемая температура в большей степени коррелирует с температурой воздуха у зондируемой подстилающей поверхности, чем с температурой почвы; 2) в силу неблагоприятных атмосферных условий (облачность, осадки и т.д.), преобладающих в арктическом регионе, провести измерение температуры во многих случаях невозможно.

По сравнению с ИК-радиометрами зондирование температуры почвы с использованием микроволновых радиометров подвержено существенно меньшему влиянию неблагоприятных атмосферных условий. Современные спутниковые микроволновые радиометры, способные получать радиояркостную температуру поверхности Земли в широком диапазоне частот от 1,4 до 183,3 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях, могут служить экспериментальными платформами для отработки методик и алгоритмов восстановления температуры поверхности почвы. В первой группе методов температура поверхности почвы восстанавливается на основе эмпирически установленной взаимосвязи между радиояркостными температурами, полученными радиометром на различных частотах и поляризациях, с температурой поверхности почвы. Погрешность восстановления температуры почвы на основе данного

подхода составляет порядка 2–12 К (Zhou et al., 2015). Вторая группа полуэмпирических методов основана на физических моделях радиотеплового излучения системы «почва – напочвенный покров – атмосфера». В рамках данных подходов помимо температуры и влажности почвы восстанавливаются одновременно и другие геофизические параметры физической модели радиотеплового излучения: водный эквивалент снежного покрова, биомасса растительности и т.д. Полуэмпирический подход обладает большей универсальностью по сравнению с эмпирическим методом и наилучшим образом адаптирован к меняющимся во времени и в пространстве свойствам зондируемой среды: «почва – напочвенный покров – атмосфера». В рамках полуэмпирических подходов на различных тестовых площадках проводятся долговременные калибровки с целью установления эмпирических связей между отдельными элементами или параметрами физической модели радиотеплового излучения с геофизическими или биофизическими параметрами зондируемой среды, которые, в свою очередь, измеряются контактными методами или дистанционно на основе хорошо валидированных спутниковых информационных продуктов. Например, калибровка модели радиотеплового излучения, используемой в алгоритме восстановления влажности почвы из радиометрических данных AMSR2 (активен с 2012 г. по настоящее время) японского спутника GCOM-W1, проводилась в степях Монголии (Koike, 2013), а для радиометра AMSR-E (прекратил свою деятельность в 2011 г.) спутника Aqua из 18 калибровочных подспутниковых полигонов лишь один находился в арктической зоне в районе метеостанции озера Тулик на Северном склоне Аляски, США (Njoku, 1999). Кроме того, в плановых мероприятиях калибровки радиотепловых моделей и валидации алгоритмов восстановления влажности почвы на основе спутниковых данных SMOS, SMAP и GCOM-W1 нет ни одного подспутникового тестового полигона, расположенного на территории России. В основном подобные полигоны находятся в континентальной части США, в Западной Европе и Западной Африке, в Монголии и Австралии.

Спутниковый информационный продукт «температура почвы», полученный на основе наблюдений микроволновых радиометров, в настоящее время официально не предоставляется ведущими космическими агентствами (Observing..., 2017). По-видимому, как показывают многочисленные исследования, это связано с высокой погрешностью определения температуры почвы, особенно в арктической зоне планеты (Jones et al., 2007). Японским и Европейским космическими агентствами, а также NASA созданы информационные продукты «влажность почвы» на основе радиометрических измерений спутников GCOM-W1 (многочастотный, 10,7 ГГц, 36,5 ГГц, поляриметрический радиометр AMSR2), SMOS (одночастотный, 1,4 ГГц, многоугловой поляриметрический радиометр MIRAS) и SMAP (одночастотный, 1,4 ГГц, поляриметрический радиометр SMAP) соответственно. Однако, как было показано в самых последних исследованиях (Al-Yaari et al., 2014; Kerr et al., 2016; Muskett et al., 2015), для большей части территории России, северной части США и Канады наблюдаются особенно большие погрешности этих спутниковых информационных продуктов относительно наземных реперных значений влажности почвы (среднеквадратическое отклонение достигает величин $\sim 0,25 \text{ см}^3/\text{см}^3$, квадрат коэффициента корреляции $\sim 0,3$). Авторы данных работ связывают высокую погрешность этих информационных продуктов с необходимостью

совершенствования моделей радиотеплового излучения с привязкой к физико-географическим условиям, характерным для конкретной зондируемой территории с использованием физических моделей диэлектрической проницаемости доминирующего типа почвенного покрова (Bircher et al., 2016).

В последние годы существенно повысилась надежность работы отечественных гидрометеорологических спутников дистанционного зондирования серии «Метеор-М». Предварительный анализ измерений радиометра МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» № 2 над Амазонкой и Антарктическим плато, выполненных с 1 сентября 2014 г. по 30 мая 2015 г. сотрудниками ТОИ ДВО РАН в сотрудничестве с НТЦ «Космонит», ОАО «Российские космические системы», показывает, что радиометр работает стабильно, радиометрические сцены обладают хорошей точностью привязки к местности (Mitnik et al., 2015). Абсолютная внешняя калибровка микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, выполненная с 31 июля по 27 августа 2014 г. над лесами Амазонки и над Тихим океаном у побережья Антарктиды, позволяет получать радиояркостную температуру на частотах 10,65; 18,7; 23,8; 31,5; 36,7; 42,0; 48,0 и 91,65 ГГц на горизонтальной и вертикальной поляризации с погрешностью 3–5 К (Mitnik et al., 2015).

Основной целью данной работы является исследование возможности использования данных радиометра МТВЗА-ГЯ отечественного спутника «Метеор-М» № 2 для разработки алгоритма восстановления влажности и температуры талой тундровой почвы. Предлагаемая методика восстановления влажности и температуры талой тундровой почвы из радиометрических данных спутника «Метеор-М» № 2 будет основана на общепринятой физической модели радиотеплового излучения (Njoku, 1999), которая в настоящее время используется в алгоритме восстановления влажности почвы из многочастотных поляриметрических наблюдений радиояркостной температуры радиометром AMSR2 спутника GCOM-W1 (Koike, 2013) и ранее использовалась в алгоритме NASA для интерпретации данных радиометра AMSR-E (Njoku, 1999). С целью повышения точности измерения влажности почвы физическая модель радиотеплового излучения будет откалибрована для физико-географических условий, характерных для территории арктической тундры России на п-ове Таймыр. Основным элементом алгоритма восстановления влажности почвы будет являться диэлектрическая модель тундровых почв с высоким содержанием органического вещества, образцы для создания которой были отобраны на подспутниковом участке, расположенном на п-ове Таймыр.

Тестовый участок, спутниковые и наземные данные

В качестве тестовых тундровых участков, расположенных в арктической зоне России, выбраны площадки зондирования в районе аэропорта г. Норильска и села Хатанга на п-ове Таймыр Красноярского края. Далее, для краткости, будем называть эти участки «Норильск» и «Хатанга» соответственно. В пределах площадки зондирования (89×198 км) на участке «Норильск» подстилающая поверхность характеризуется процентным содержанием

кустарниковой тундры — 35,1%, травянисто-кустарниковой тундры — 34,1%, светлохвойных листопадных (или лиственничных) или темнохвойных (или еловых) редколесий (участки тундры, занятые отдельно стоящими деревьями) — 16,4%, открытых грунтов и выходов горных пород, включая урбанизированные территории, — 9,8%, водных объектов и болот — 4,6%. На участке «Хатанга» в пределах пиксела зондирования следующие типы подстилающей поверхности оказались характерными: светлохвойные листопадные (или лиственничные) или темнохвойные (или еловые) редколесья (участки тундры, занятые отдельно стоящими деревьями) — 67,2%, травянисто-кустарниковая тундра — 20,9%, открытых грунтов и выходов горных пород, включая урбанизированные территории, — 5,2%, водных объектов и болот — 3,7%, другое — 3%. Из приведенной статистики следует, что доминирующим типом растительного покрова (около 70%) на участке «Норильск» является травянистая и кустарниковая тундра, а на участке «Хатанга» доминируют участки тундры, занятые отдельно стоящими деревьями. Проведенные оценки выполнены на основе электронной карты растительных покровов Европейского космического агентства GlobCover (ESA..., 2017).

В различных ландшафтных условиях на тестовом участке «Норильск» (на холмах и в долинах рек и озер, в заболоченной и относительно сухой части тундрового покрова) были отобраны четыре почвенных образца в виде монолитов поверхностной части грунта высотой 10 см, которые представляли собой механическую смесь органической массы различной степени разложения с минеральной частью. Установлено, что для воздушно-сухих почвенных образцов плотность, содержание физической глины (по Качинскому) и органического вещества (в пересчете на углерод) варьировались от 0,69 до 1,09 г/см³, от 31,5 до 52,8%, и от 12,1 до 35,5% соответственно. Исходя из того, что верхний слой почвы (порядка десятой части длины волны для талой почвы) является наиболее существенным при формировании микроволнового излучения, далее при моделировании будем рассматривать почвенный покров зондируемого участка в виде однородного полупространства, сформированного почвами с высоким содержанием органического вещества.

В качестве источника экспериментально измеренных значений радиояркостной температуры использовались данные радиометра МТВЗА-ГЯ отечественного спутника «Метеор-М» № 2 (Mitnik et al., 2015). Для анализа в данной работе использовались временные ряды радиояркостной температуры, измеренные радиометром МТВЗА-ГЯ с 1 января по 31 декабря 2015 г. для двух тестовых участков «Норильск» и «Хатанга». Время наблюдения радиояркостных температур спутником «Метеор-М» № 2 над участками «Норильск» и «Хатанга» варьировалось от 4 до 6 и от 12 до 15 часов (UTC) для нисходящего и восходящего витка соответственно.

В связи с тем, что действующей сетью метеорологических станций «Росгидромет» не проводится измерение влажности и температуры почвы на п-ове Таймыр, в качестве опорной информации о влажности и температуре почвы в летнее время будут использованы данные хорошо откалиброванных информационных продуктов L2_SM_P «влажность почвы» спутника SMAP и MODIS LST (MOD11A1, MYD11A1) и «температура поверхности почвы» спутников Terra и Aqua.

Оценка стабильности работы радиометра МТВ3А-ГЯ спутника «Метеор-М» № 2

В открытой печати найдено всего лишь несколько работ, посвященных калибровке и валидации радиометров МТВ3А-ГЯ метеорологических спутников серии «Метеор-М». При этом стабильность радиометра МТВ3А-ГЯ спутника «Метеор-М» № 2, функционирующего в настоящее время в штатном режиме на орбите, изучалась в короткий промежуток времени с 1 сентября 2014 г. по 30 мая 2015 г. над лесными массивами Амазонки и Антарктическим плато в районе купола Dome C (Mitnik et al., 2015). В данной работе продолжена работа по оценке стабильности измерений радиометра МТВ3А-ГЯ отечественного спутника «Метеор-М» № 2 относительно синхронных измерений (около 5–7 часов) хорошо откалиброванного радиометра AMSR2 японского спутника GCOM-W1 для территорий тундровых тестовых участков «Норильск» и «Хатанга» с 1 января по 31 декабря 2015 г. В качестве примера на *рис. 1* приведены временные ряды радиоярких температур, измеренных радиометрами МТВ3А-ГЯ и AMSR2 на участке «Норильск» в течение календарного 2015 г. В ходе корреляционного анализа установлена высокая степень согласованности между значениями радиоярких температур, измеренных радиометром МТВ3А-ГЯ и радиометром AMSR2 на вертикальной и горизонтальной поляризациях на частотах 10,7; 18,7 и 36,7 ГГц за годичный период. На *рис. 2* представлена корреляционная зависимость радиоярких температур, измеренных радиометрами МТВ3А-ГЯ и AMSR2 над участком «Норильск» в течение 2015 г.

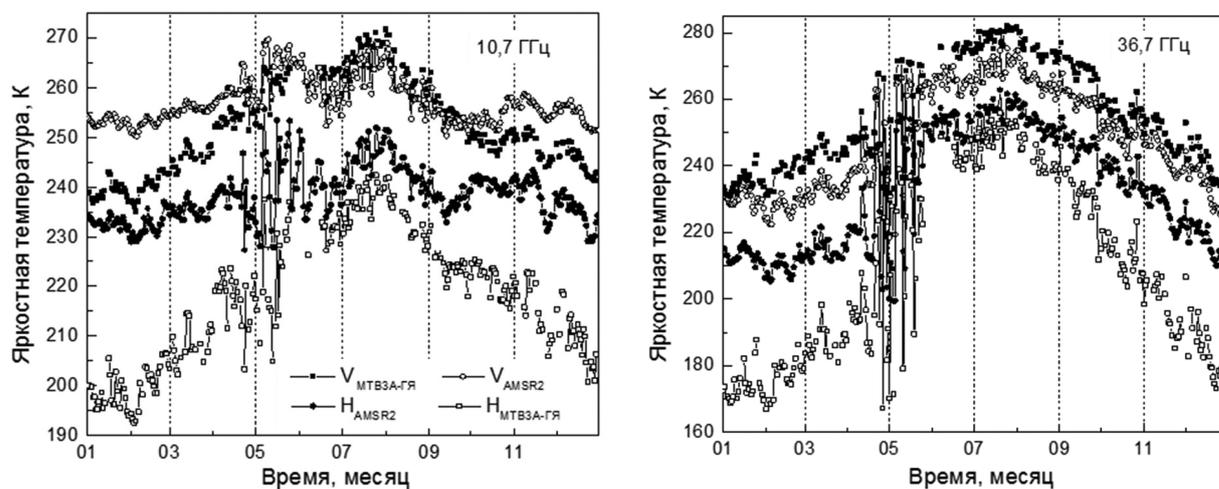


Рис. 1. Временные зависимости радиоярких температур, измеренные радиометрами МТВ3А-ГЯ и AMSR2 на частотах 10,7 и 36,7 ГГц (36,5 ГГц для AMSR2) над тестовым участком «Норильск» в течение 2015 г. Буквами Н и V обозначены горизонтальная и вертикальная поляризации соответственно

Значение квадрата коэффициента корреляции между временными рядами радиоярких температур, измеренных радиометрами МТВ3А-ГЯ и AMSR2 на частотах 10,6 ГГц, 18,7 ГГц и 36,7 ГГц, оказалось равным 0,65, 0,86 и 0,94 соответственно. Найденные значения квадрата коэффициента корреляции слабо варьируются в зависимости от тестового участка «Норильск» или «Хатанга», а также от поляризации принимаемого сигнала. При этом разница в абсолютных значениях между радиояркими температурами (см. *рис. 1* и *2*) обусловлена различным пространственным разрешением двух радиометров и различными углами

зондирования (угол зондирования радиометра AMSR2 на 10° меньше, чем угол наблюдения 65° у МТВЗА-ГЯ). В течение времени, когда почва находилась в талом состоянии, с конца мая по конец сентября, значения радиоярких температур, измеренные радиометром МТВЗА-ГЯ, больше для вертикальной и меньше для горизонтальной поляризации соответствующих значений, измеренных радиометром AMSR2 (угол наблюдения 55°). Это соответствует объяснимому поведению угловых зависимостей радиоярких температур, значения которых увеличиваются и уменьшаются с ростом угла наблюдения соответственно для вертикальной и горизонтальной поляризации. Однако в период, когда почва мерзлая и устанавливается снежный покров, значения радиояркой температуры, измеренные МТВЗА-ГЯ на частоте 10,7 ГГц и вертикальной поляризации, становятся меньше, чем соответствующие значения, измеренные радиометром AMSR2 (рис. 1). Качественно данное явление может быть объяснено на основе анализа теоретической работы (Schwank et al., 2015), выполненной для радиометра MIRAS спутника SMOS, работающего на частоте 1,4 ГГц. В данной работе установлено, что вариациями радиояркой температуры, измеренной вблизи угла наблюдения 55° на вертикальной поляризации, можно пренебречь в случае отсутствия либо наличия снежного покрова плотностью до 400 г/см^3 . При этом в случае наличия снежного покрова плотностью до 400 г/см^3 значения радиояркой температуры на горизонтальной поляризации на 20 К больше радиояркой температуры, наблюдаемой в случае отсутствия снежного покрова. Нехарактерное поведение радиояркой температуры (рис. 1), измеренное радиометром МТВЗА-ГЯ в районе угла Брюстера в зимний период времени, нуждается в дальнейшем более детальном изучении. В связи с этими обстоятельствами далее будет рассматриваться лишь период времени, когда почва находилась в талом состоянии. При этом теоретическая модель и алгоритм восстановления температуры и влажности почвы будут строиться для частоты 10,7 ГГц, подверженной наименьшему влиянию растительного покрова и атмосферы и обладающей большей проникающей способностью по сравнению с другими частотами: 18,7; 36,5 ГГц радиометра МТВЗА-ГЯ, соответствующих окнам прозрачности атмосферы.

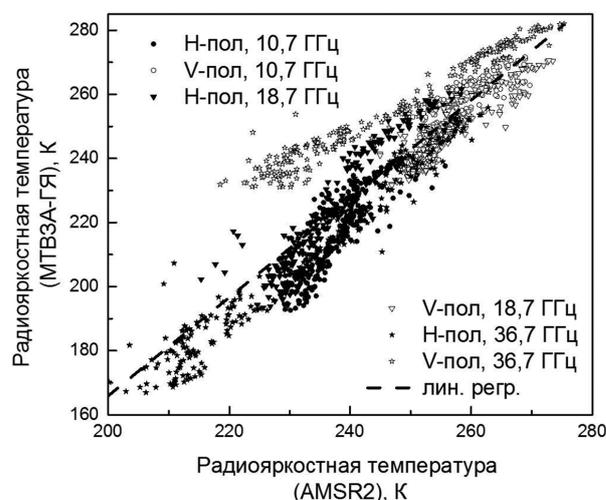


Рис. 2. Зависимость радиоярких температур, измеренных радиометром МТВЗА-ГЯ и AMSR2 над тестовым участком «Норильск» в течение 2015 г. Статистика линейной регрессии по всем частотам и поляризациям: квадрат коэффициента корреляции — 0,82, среднеквадратическое отклонение — 10,7 К. Буквами H и V обозначены горизонтальная и вертикальная поляризации соответственно

Теоретическая модель радиотеплового излучения тундрового почвенного покрова

Основой для создания физической модели радиотеплового излучения талого почвенного покрова, покрытого растительностью, выступит общепринятая модель, которая в настоящее время используется в алгоритме восстановления влажности почвы из многочастотных поляриметрических наблюдений радиояркостной температуры радиометром AMSR2 спутника GCOM-W1 (Koike, 2013) и ранее использовалась в алгоритме NASA (Njoku, 1999) для интерпретации данных радиометра AMSR-E. Пренебрегая влиянием атмосферы, радиояркостная температура Tb_p почвы, покрытой растительным слоем, наблюдаемая под углом θ радиометром в космическом пространстве на горизонтальной ($p=H$) и вертикальной ($p=V$) поляризациях на заданной частоте, может быть описана с помощью модели переноса излучения (Chukhlantsev, 2006):

$$Tb_p = Tb_{sp}e^{-\tau_c} + T_c(1 - e^{-\tau_c})(1 + e^{-\tau_c}r_{sp}), \quad (1)$$

где Tb_{sp} — радиояркостная температура почвенного покрова, непокрытого растительностью,

$$Tb_{sp} = [1 - r_{sp}]T_s; \quad (2)$$

T_s — эффективная температура почвы; τ_c — оптическая толщина растительного покрова (Chukhlantsev, 2006),

$$\tau_c = bW_c; \quad (3)$$

b — параметр, зависящий от типа растительности, поляризации и частоты электромагнитной волны; W_c — содержание влаги в растительности ($\text{кг}/\text{м}^2$); T_c — температура растительного покрова; r_{sp} — отражательная способность почвы. Отражательная способность почвы в общем виде может быть представлена в виде полуэмпирического выражения (Wang, Choudhury, 1981):

$$r_{sH} = [(1-Q)r_{oH} + Qr_{oV}]e^{-h_r}, \quad r_{sV} = [(1-Q)r_{oV} + Qr_{oH}]e^{-h_r}, \quad (4)$$

где h_r — параметр шероховатости поверхности почвы, который зависит от частоты, угла зондирования и прямо пропорционален среднеквадратическому отклонению высот неровностей поверхности почвенного покрова; Q — параметр деполяризации, зависящий от h_r и длины корреляции неровностей поверхности почвы, описывающий долю ко- и кросс-поляризационных компонент в отражательной способности почвы; r_{oV} и r_{oH} — коэффициенты отражения Френеля от почвы на вертикальной и горизонтальной поляризациях соответственно:

$$r_{oV} = \left| \frac{\epsilon_s \cos \theta - \sqrt{\epsilon_s \sin^2 \theta}}{\epsilon_s \cos \theta + \sqrt{\epsilon_s \sin^2 \theta}} \right|^2, \quad r_{oH} = \left| \frac{\sqrt{\epsilon_s \sin^2 \theta} - \cos \theta}{\sqrt{\epsilon_s \sin^2 \theta} + \cos \theta} \right|^2; \quad (5)$$

ϵ_s — комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почвенного покрова, которая является функцией частоты электромагнитной волны f , гранулометрического состава (содержания глинистой фракции) C , содержания органического вещества O , плотности сухой почвы ρ_d , влажности m_v и температуры почвы, $\epsilon_s = \epsilon_s(m_v, \rho_d, T_s, f, C, O)$.

Недостатками модели (1) являются: а) учет только поглощения волны в растительном покрове при пренебрежении явлением объемного рассеяния волн на элементах растительного покрова и рефракцией волны, а также отражением волны от границы воздух-растительность; б) не принятие в расчет рельефа местности; в) пренебрежение влиянием водоемов в формировании радиотеплового излучения (однако, как показано в работе (Ye et al., 2015), если доля водных объектов в пределах пикселя зондирования не превышает 8%, то максимальное отклонение между измеренными и рассчитанными значениями радиояркостной температуры без учета водных объектов не превышает 4 К (меньше погрешности измерения радиояркостной температуры радиометром МТВЗА-ГЯ)); г) пренебрежение зависимостью толщины оптического покрова от поляризации излучения в пределах пикселя зондирования радиометра МТВЗА-ГЯ.

Практическое восстановление независимо температуры почвы и растительного покрова является трудной проблемой. Для упрощения задачи в данной работе при разработке алгоритмов восстановления температуры и влажности почвы в модели (1) будем считать $T_c = T_s$. Как показано в работе (Basharinov, Shutko, 1975), данное условие наиболее вероятно реализуется примерно в 6 часов по местному времени. В это время значения температуры и диэлектрической проницаемости слабо варьируются по глубине в подстилающей поверхности. Для минимизации разницы между температурой растительности и почвы, вертикальных неоднородностей в профиле диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности, а также разницы в температуре между различными типами растительного покрова (O'Neill et al., 2014) в пределах пикселя зондирования будут использоваться лишь утренние орбиты спутников с 4 до 7 часов.

В алгоритмах (Koike, 2013; Njoku, 1999) значения параметров Q и h_r в модели (1)–(5) определяются эмпирически в ходе долговременной калибровки на специально выбранных подспутниковых полигонах, влиянием растительного покрова на которых можно пренебречь либо учесть с использованием выражения (3). При этом значения КДП почвы рассчитываются с использованием универсальных диэлектрических моделей (Dobson et al., 1985; Mironov et al., 2009; Wang, Schmugge, 1980). Найденные таким образом значения параметров Q и h_r характеризуют интегральные временные и пространственные особенности отражательной способности почвенного покрова, присущего физико-географическим условиям, в которых расположен подспутниковый тестовый участок. В разделах ниже описывается процедура калибровки данных параметров в модели (1)–(5) для тундровых подспутниковых участков п-ова Таймыр с использованием обобщенной диэлектрической модели тундровых почв с высоким содержанием органического вещества для частоты зондирования 10,7 ГГц радиометра МТВЗА-ГЯ.

Обобщенная диэлектрическая модель талой тундровой почвы

Обобщенная диэлектрическая модель для тундровых почв с высоким содержанием органического вещества будет построена на основе образцов почв, отобранных из верхнего горизонта почвенного покрова: 1) на тестовом участке «Норильск» с содержанием органического вещества 12,1 и 22,3%; 2) в районе метеостанций Марресале, на п-ове Ямал; 3) в районе озера Тулик на северном склоне Аляски с содержанием органического вещества 50 и 80% соответственно; 4) в смешанном лесу в районе г. Красноярска (перегнивший опад) с содержанием органического вещества 90% (Mironov et al., 2016). Процедура обработки почвенных образцов, методика диэлектрических измерений и регрессионного анализа, используемые при создании многочастотных и одночастотных диэлектрических моделей, изложены в работах (Mironov et al., 2009, 2015). Для пяти почвенных образцов на диэлькометрической установке коаксиально-волноводным методом были измерены показатели преломления и поглощения на частоте 10,7 ГГц при вариациях объемной влажности от 0,005 до 0,620 см³/см³, плотности сухой почвы от 0,56 до 0,94 г/см³, температуры от 0 до 30 °С. Зависимости показателя преломления $n_s = \text{Re} \sqrt{\epsilon_s}$ и поглощения $\kappa_s = \text{Im} \sqrt{\epsilon_s}$ от влажности почвы, измеренные на частоте 10,7 ГГц при температуре 20 °С, приведены на *рис. 3*. Экспериментально измеренные зависимости показателя преломления и поглощения от объемной влажности почвы могут быть описаны рефракционной диэлектрической моделью смеси, выражаемой в виде кусочно-линейно регрессионной зависимости в виде:

$$n_s = \begin{cases} n_d + (n_b - 1)m_v, & m_v < m_{nt}, \\ n_d + (n_b - 1)m_{nt} + (n_w - 1)(m_v - m_{nt}), & m_v \geq m_{nt}, \end{cases} \quad (6a)$$

$$\kappa_s = \begin{cases} \kappa_d + \kappa_b m_v, & m_v < m_{kt}, \\ \kappa_d + \kappa_b m_{kt} + \kappa_w (m_v - m_{kt}), & m_v \geq m_{kt}. \end{cases} \quad (6b)$$

Здесь показатель преломления и поглощения для сухого почвенного образца $n_d = 1,38 \pm 0,05$ и $\kappa_d = 0,005 \pm 0,024$, для связанной воды — $nb = 3,51 \pm 0,57$ и $\kappa_b = 0,61 \pm 0,55$, для свободной воды — $n_w = 8,20 \pm 0,16$ и $\kappa_w = 2,07 \pm 0,04$. Предельное количество связанной воды $m_{nt} = 0,16 \pm 0,01$ и $m_{kt} = 0,07 \pm 0,02$ найдено отдельно по зависимости показателя преломления и поглощения от объемного содержания воды в почве соответственно. Значения данных параметров получены в ходе регрессионного анализа экспериментальных данных, приведенных на *рис. 3*, с использованием модели (6).

В результате корреляционного анализа установлено, что зависимость показателя преломления (поглощения) пяти почвенных образцов с содержанием органической фракции от 12,1 до 90,0% при положительной температуре 20 °С на частоте 10,7 ГГц и вариациях объемной влажности от 0,005 до 0,620 см³/см³, плотности сухой почвы от 0,56 до 0,94 г/см³ почвенных образцов, со среднеквадратической погрешностью 0,11 (0,03) и квадратом коэффициента корреляции 0,992 (0,991) описывается рефракционной диэлектрической моделью смеси (6), выражаемой в виде кусочно-линейной регрессионной зависимости от объемной влажности

почвы. Для возможности расчета показателя преломления и поглощения в зависимости от вариации температуры почвы от 0 до +30 °С были найдены следующие эмпирические поправочные формулы для модели (6):

$$n_s = 0,048m_v(20^\circ\text{C} - T_s), \quad \kappa_s = -0,0146m_v(20^\circ\text{C} - T_s). \quad (7)$$

Созданная обобщенная диэлектрическая модель талых почв с высоким содержанием органического вещества будет выступать в качестве основного элемента алгоритма восстановления температуры и влажности почвы на тестовых участках п-ова Таймыр на основе радиометрических данных спутника «Метеор-М» № 2.

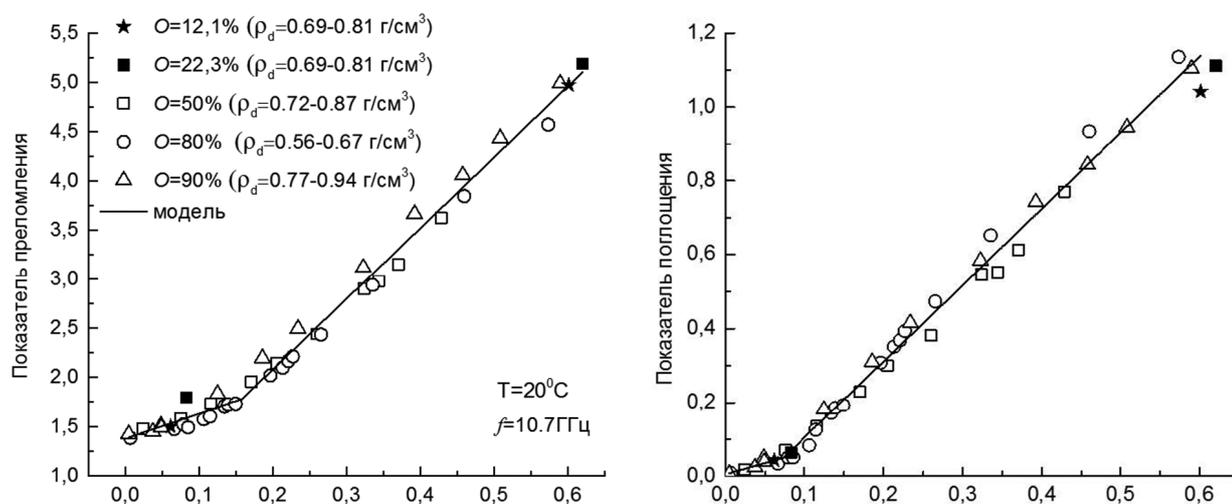


Рис. 3. Зависимость показателя преломления и поглощения от объемной влажности почвы для почвенных образцов с различным содержанием органического вещества (в пересчете на углерод). Символами обозначены результаты измерений, сплошной линией расчет по модели (6)

Калибровка модели радиотеплового излучения на основе данных радиометра МТВЗА-ГЯ

Калибровка физической модели радиотеплового излучения талого почвенного покрова (1)–(5), которая в настоящий момент используется в качестве базовой модели для алгоритмов восстановления влажности почвы на основе радиометрических данных японского спутника GCOM-W1 (Koike, 2013), будет осуществляться на тундровых тестовых участках «Норильск» и «Хатанга» п-ова Таймыр, Красноярский край. Физическая модель радиотеплового излучения (Koike, 2013) была модифицирована с использованием созданной обобщенной диэлектрической модели талой почвы с высоким содержанием органического вещества (6)–(7), характерной для поверхностной части деятельного слоя тундровых почв тестовых участков п-ова Таймыр. Калибровка модели радиотеплового излучения (1)–(5) заключалась в нахождении для данных двух тестовых участков средних по времени значений параметра

деполяризации (Q), учитывающего кросс-поляризационную компоненту в общем излучении почвенного покрова, и параметра шероховатости поверхности почвы (h_r), входящих в физическую модель радиотеплового излучения почвенного покрова (1)–(5). Параметры деполяризации и шероховатости поверхности почвы (в рамках упрощенного подхода полагались не зависящими от поляризации электромагнитного излучения) были найдены в ходе решения обратной задачи при минимизации нормы невязки между рассчитанными, с использованием физической модели радиотеплового излучения (1)–(7), и измеренными, радиометром МТВЗА-ГЯ, временными рядами значений радиояркой температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях на частоте 10,7 ГГц. При решении обратной задачи дополнительно, в качестве независимых входных параметров, в модели (1)–(7) использовались значения влажности и температуры почвы тестовых участков по данным хорошо валидированных спутниковых информационных продуктов SMAP (L2_SM_P) и MODIS LST (MOD11A1, MYD11A1) соответственно. При калибровке влиянием растительного покрова в модели (1) пренебрегалось, $\tau_c \approx 0$. С целью уменьшения влияния растительности на определяемые в ходе калибровки параметры модели (1)–(5) радиотеплового излучения почвенного покрова были выбраны два отрезка времени «минимальной биомассы» (при талом состоянии почвы), определяемые с момента увеличения значения индекса NDVI с минимального (24.05.2015) до уровня примерно в 80% (18.06.2015) от максимального значения за вегетационный период 2015 г. и с момента уменьшения значения индекса NDVI с уровня около 80% (17.08.2015) до момента (24.09.2015) минимального значения за вегетационный период 2015 г. Отметим, что значение индекса NDVI усреднялось по площади пиксела зондирования радиометра МТВЗА-ГЯ, соответствующей частоте 10,7 ГГц (Mitnik et al., 2015). Временной ход значений индекса NDVI на тестовых участках приведен на *рис. 4*.

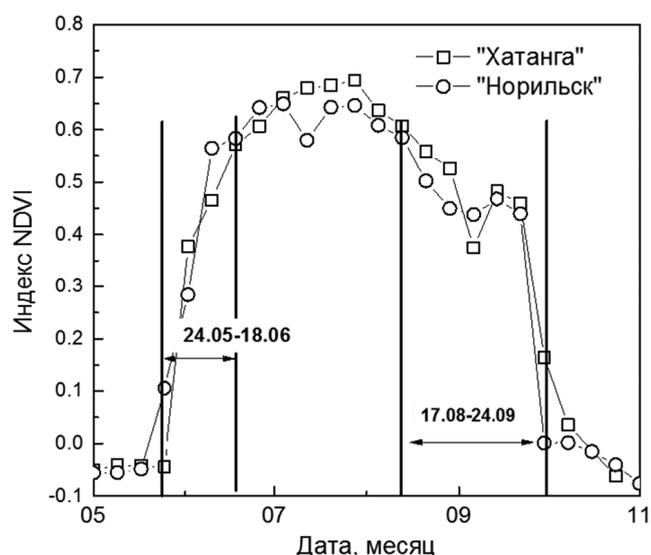


Рис. 4. Временной ход величины биомассы растительности на тестовом участке «Норильск» и «Хатанга» в 2015 г. Вертикальными линиями отмечены отрезки времени «минимальной биомассы». Период всего вегетационного цикла длился с 24.05 по 24.09

В результате задача оптимизации сводилась к нахождению двух параметров (Q , h_r) из 11 значений минимизируемого функционала, радиояркие температуры для расчета

которого брались в дни, синхронные по отношению к дням измерения индекса NDVI спутниками Terra/Aqua (см. *рис. 4*, измерения в дни «минимальной биомассы»). Найденные в ходе калибровки параметры деполяризации и шероховатости поверхности почвы сведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Калибровочные значения параметров деполяризации (Q) и шероховатости (h_r)

Тестовый участок	Q		h_r	
	«Минимальная биомасса»	Весь вегетационный цикл	«Минимальная биомасса»	Весь вегетационный цикл
«Норильск»	0,21±0,03	0,23±0,03	0,46±0,04	0,47±0,04
«Хатанга»	0,22±0,07	0,23±0,06	0,43±0,09	0,45±0,09

Значения параметров деполяризации и шероховатости для двух тестовых участков близки между собой (*табл. 1*). При этом для тестового участка «Хатанга» наблюдаются большие среднеквадратические отклонения от средних величин значений параметров деполяризации и шероховатости, чем для тестового участка «Норильск». Это может быть связано с наличием на тестовом участке «Хатанга» большей доли отдельно стоящих деревьев и кустарников в пределах пикселя зондирования радиометра МТВЗА-ГЯ, чем на тестовом участке «Норильск», что могло приводить к дополнительному объемному рассеянию волны на элементах растительного покрова. Значения параметров деполяризации и шероховатости были найдены также и для всего вегетационного периода на тестовых участках (при талой почве). Значения параметров деполяризации и шероховатости, найденных в период «минимальной биомассы» и за весь вегетационный цикл (*рис. 4*), близки между собой, что может свидетельствовать о слабом влиянии биомассы растительного тундрового покрова тестовых участков на величину восстановленных параметров. Найденные значения параметров деполяризации и шероховатости, соответствующие дням «минимальной биомассы», характеризуют интегральные временные и пространственные особенности отражательной способности почвенного покрова подспутниковых тундровых тестовых участков, типичных для физико-географических условий п-ова Таймыр. Найденные оценки (*табл. 1*) для параметров модели (1)–(5) радиотеплового излучения позволяют создать алгоритм восстановления температуры и влажности тундрового почвенного покрова п-ова Таймыр с использованием радиометрических данных спутника «Метеор-М» № 2.

Алгоритм восстановления температуры и влажности тундрового почвенного покрова на основе данных радиометра МТВЗА-ГЯ

В результате выполненной калибровки модели (1)–(5) радиояркая температура тундрового почвенного покрова, наблюдаемая на вертикальной и горизонтальной поляризации

на частоте 10,7 ГГц радиометром МТВЗА-ГЯ, может быть представлена в виде функции двух переменных: объемной влажности (m_v) и температуры (T_s) почвы:

$$Tb_p = Tb_p(m_v, T_s). \quad (8)$$

При этом параметры деполаризации и шероховатости, входящие в модель радиотеплового излучения (1)–(5), были заданы равными средним значениям этих величин, характерных для двух тестовых участков 0,215 и 0,445 соответственно (табл. 1).

Алгоритм восстановления температуры и влажности почвы основан на решении обратной задачи минимизацией нормы невязки $F(m_v, T_s)$ между значениями радиояростной температуры измеренной (Tb_p^m) и рассчитанной (Tb_p^{th}) одновременно на вертикальной и горизонтальной поляризациях:

$$F(m_v, T_s) = \sum_{p=H,V} |Tb_p^m - Tb_p^{th}|^2. \quad (9)$$

Численно обратная задача решалась методом оптимизации Левенберга-Марквардта (Gill, Murray, Wright, 1981).

Созданный алгоритм был протестирован на территории двух калибровочных тестовых участках «Норильск» и «Хатанга». В качестве примера на рис. 5 и 6 приведены временные ряды значений влажности и температуры почвы по данным хорошо валидированных спутниковых информационных продуктов SMAP и MODIS LST и соответствующие восстановленные значения из радиометрических данных МТВЗА-ГЯ с использованием созданного алгоритма.

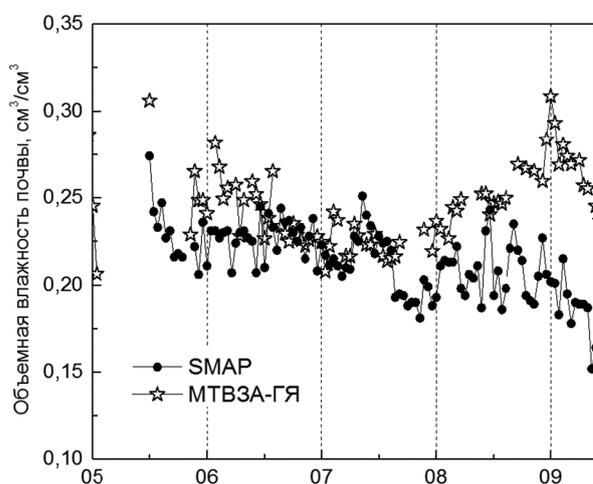


Рис. 5. Значения влажности почвы по данным информационного продукта спутника SMAP и восстановленные значения из радиометрических данных МТВЗА-ГЯ

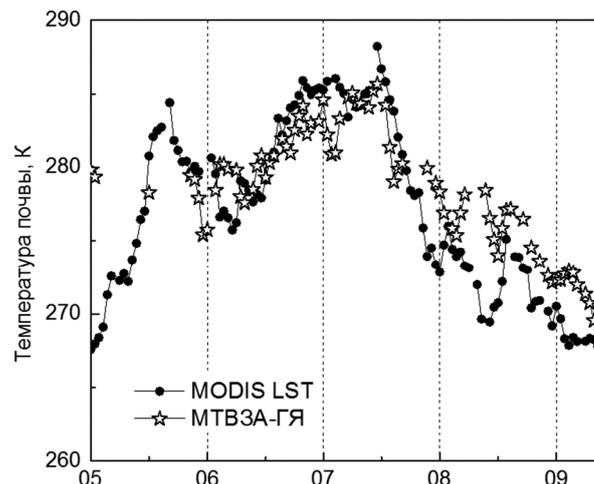


Рис. 6. Значения температуры почвы по данным информационного продукта MODIS LST и восстановленные значения из радиометрических данных МТВЗА-ГЯ

Среднеквадратическое отклонение между восстановленными значениями температуры почвы и значениями температуры поверхности почвы, полученными на основе спутникового информационного продукта MODIS LST, оказалось не более 5,9 К, при этом квадрат

коэффициента детерминации восстановленных значений температуры почвы относительно значений температуры продукта MODIS LST оказался не лучше 0,37 для двух тестовых участков «Норильск» и «Хатанга». Среднеквадратическое отклонение между восстановленными значениями влажности почвы и значениями влажности почвы, полученными на основе спутникового информационного продукта SMAP (L2_SM_P), оказалось не более $0,03 \text{ см}^3/\text{см}^3$ при вариациях влажности почвы от $0,12$ до $0,30 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (по данным SMAP) для двух тестовых участков. Для тестирования алгоритма на территориях, отличных от калибровочных тестовых участков, были выбраны две расширенные прямоугольные области со сторонами $100 \times 350 \text{ км}$ (большая сторона которого ориентирована вдоль меридиана), содержащие калибровочные тестовые участки «Норильск» и «Хатанга» (рис. 7 и 8).

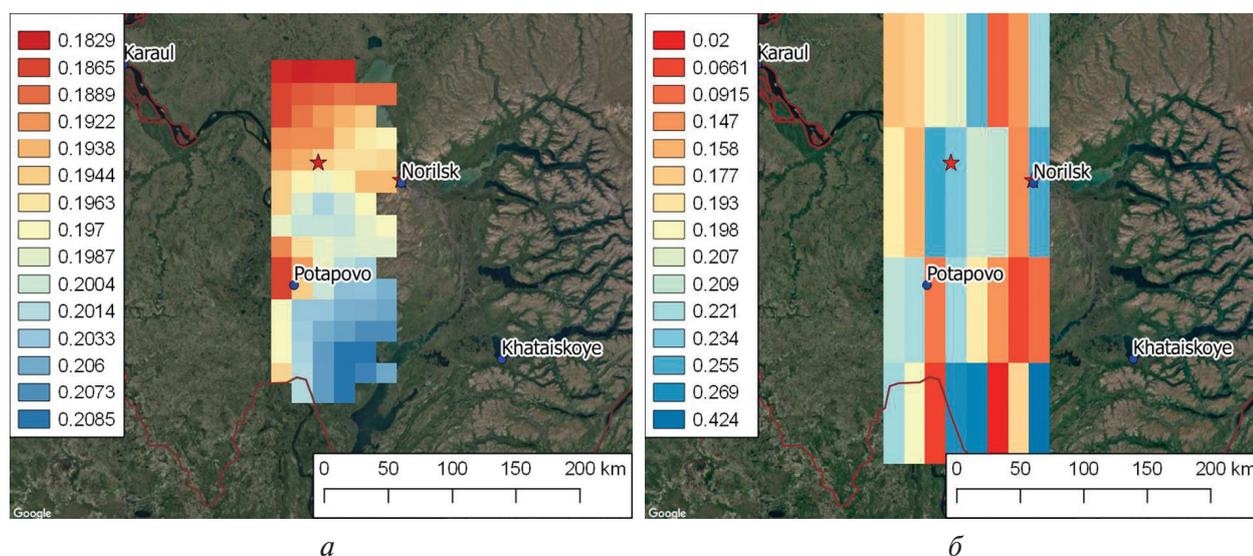


Рис. 7. Карты влажности почвы в районе тестового участка «Норильск», построенные на основе созданного алгоритма из радиометрических данных МТВЗА-ГЯ (а), и на основе спутникового информационного продукта SMAP (б). Величина влажности почвы изображена в цветовой градации, цветовая шкала имеет размерность $[\text{см}^3/\text{см}^3]$

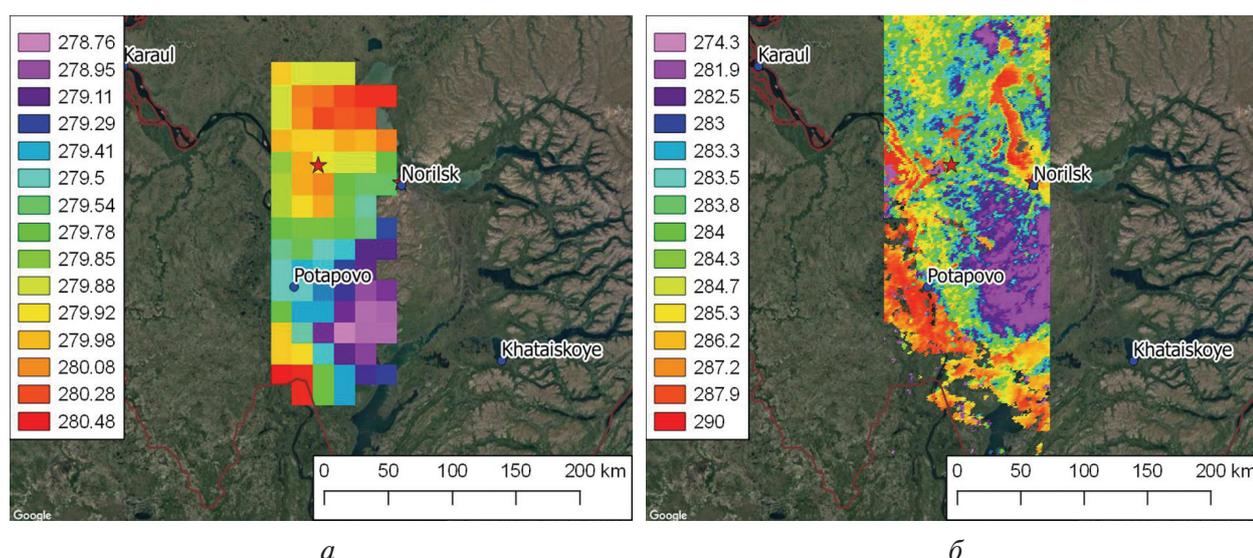


Рис. 8. Карты температуры почвы в районе тестового участка «Норильск», построенные на основе созданного алгоритма из радиометрических данных МТВЗА-ГЯ (а), и на основе спутникового информационного продукта MODIS LST (б). Величина температуры почвы изображена в цветовой градации, цветовая шкала имеет размерность $[K]$

В пределах расширенной прямоугольной области среднеквадратическая ошибка восстановленных значений влажности почвы возросла в два раза, а температуры почвы оказалась того же порядка — 6,5 К. Возрастание ошибок восстановления параметров для расширенной области может быть обусловлено такими неучтенными в модели (1)–(5) явлениями, как рефракция и объемное рассеяние волн в слое растительного покрова, вариациями различных типов растительности и почв, присутствием водных объектов в пределах пикселя зондирования радиометра МТВЗА-ГЯ.

Отметим, что на *рис. 7* и *8* более мелкий шаг сетки (12×12 км) карты (*a*) по сравнению с картой (*b*) не стоит воспринимать как лучшее разрешение МТВЗА-ГЯ по сравнению с радиометром SMAP. Мелкая сетка карт на *рис. 7a* и *8a* отражает лишь тот факт, что измерение радиояростной температуры радиометром МТВЗА-ГЯ происходит с таким интервалом во времени, за который центр пикселя зондирования перемещается по поверхности земли на расстояние порядка 12 км. При этом значение радиояростной температуры, а следовательно, и восстановленные значения влажности и температуры почвы в каждом пикселе (12×12 км) на *рис. 7a* и *8a* нужно воспринимать как усредненное значение в пределах площади первой зоны Френеля (89×198 км) для частоты 10,7 ГГц радиометра МТВЗА-ГЯ.

Заключение

Основной целью данной работы являлось исследование возможности использования данных радиометра МТВЗА-ГЯ отечественного спутника «Метеор-М» № 2 для разработки алгоритма восстановления влажности и температуры талой тундровой почвы. Предлагаемая методика восстановления влажности и температуры почвы из радиометрических данных спутника «Метеор-М» № 2 была основана на общепринятой физической модели радиотеплового излучения (Njoku, 1999), которая в настоящее время используется в алгоритме восстановления влажности почвы из многочастотных, поляриметрических наблюдений радиояростной температуры радиометром AMSR2 спутника GCOM-W1 и ранее использовалась в алгоритме NASA для интерпретации данных радиометра AMSR-E. Физическая модель радиотеплового излучения была откалибрована для физико-географических условий, характерных для двух тестовых участков, расположенных на территории арктической тундры России на п-ове Таймыр. Основным элементом алгоритма восстановления температуры и влажности почвы выступила обобщенная диэлектрическая модель тундровых почв с высоким содержанием органического вещества, образцы для создания которой были отобраны на тестовом участке, расположенном на п-ове Таймыр.

Несмотря на существенные упрощения модели радиоизлучения почвы, полученные в данной работе погрешности измерения температуры почвы до 6,5 °С и влажности почвы до 0,06 см³/см³ указывают на перспективность создания отечественного информационного продукта «влажность и температура поверхности почвы» на основе данных радиометра МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» № 2. Следующие наиболее значимые факторы должны быть включены

в модель излучения почвы с целью увеличения точности восстановления температуры почвы: 1) влияние растительного покрова; 2) присутствие водных объектов и неоднородность типов почвенного покрова в пределах пикселя зондирования МТВЗА-ГЯ. Кроме того, в будущем должна быть решена проблема построения модели радиоизлучения и алгоритма восстановления температуры почвы для промерзающего или оттаивающего излучающего слоя почвы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 16-45-242162, а также Программы II.12.1. «базовых» фундаментальных исследований СО РАН. Кроме того, хотим выразить благодарность анонимному рецензенту за замечания, которые позволили улучшить качество статьи.

Литература

1. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. В 2-х т. М.: Росгидромет. 2008. Т. 1. С. 230–291. URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/index00.htm>.
2. *Al-Yaari A., Wigneron J.P., Ducharne A., Kerr Y., de Rosnay P., de Jeu R., Govind A., Al Bitar A., Albergel C., Munoz-Sabater J.* 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.
3. *Basharinov A., Shutko A.* Simulation studies of the SHF radiation characteristics of soils under moist conditions // *NASA Technical Translation*. 1975. TT F-16. P. 489.
4. *Bircher S., Demontoux F., Razafindratsima S., Zakharova E., Drusch M., Wigneron J.-P., Kerr Y.H.* L-Band Relative Permittivity of Organic Soil Surface Layers — A New Dataset of Resonant Cavity Measurements and Model Evaluation // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. No. 12. P. 1–17.
5. *Chukhlantsev A.A.* Microwave radiometry of vegetation canopies. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2006. 287 p.
6. *Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A.* Microwave dielectric behavior of wet soil — Part II: Dielectric mixing models // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1985. Vol. GE-23. P. 35–46.
7. ESA Data User Element. GlobCover Map. 2017. URL: http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php.
8. *Gill P.E., Murray W., Wright M.H.* Practical optimization. L.: Academic Press, 1981. 401 p.
9. *Jones L.A., Kimball J.S., McDonald K.C., Chan S.T.K., Njoku E.G., Oechel W.C.* Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45. No. 7. P. 2004–2018.
10. *Kerr Y.H., Al-Yaari A., Rodriguez-Fernandez N., Parrens M., Molero B., Leroux D., Bircher S., Mahmoodi A., Mialon A., Richaume P.* Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 180. P. 40–63.
11. *Koike T.* Description of the GCOM-W1 AMSR2. Soil Moisture Algorithm Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 Algorithms. Japan Aerospace Exploration Agency. Earth Observation Research Center, 2013. 119 p.
12. *Mironov V.L., Kosolapova L.G., Fomin S.V.* Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2009. Vol. 47. No. 7. P. 2059–2070.
13. *Mironov V.L., Kerr Y.H., Kosolapova L.G., Savin I.V., Muzalevskiy K.V.* A Temperature-Dependent Dielectric Model for Thawed and Frozen Organic Soil at 1.4 GHz // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. Vol. 8. No. 9. P. 4470–4477.
14. *Mironov V.L., Savin I.V., Karavayevsky A.Y.* Dielectric model in the frequency range 0.05 to 15 GHz at temperatures –30°C to 25°C for the samples of organic soils and litter collected in Alaska, Yamal, and Siberian Taiga // *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Beijing. 2016. P. 2684–2687.
15. *Mitnik L.M., Cherny I.V., Mitnik M.L., Chernyavskii G.M., Kuleshov V.P., Baranyuk A.V.* The MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M no. 2 satellite: the first 10 months in an orbit, calibration of data and retrieval of geophysical parameters // *Abstract Intern. Symposium “Atmospheric Radiation and Dynamics” (ISARD-2015)*. Saint-Petersburg-Petrodvorets, 2015. P. 23–25.
16. *Muskett R.R., Romanovsky V.E., Cable W.L., Kholodov A.L.* Active-Layer Soil Moisture Content Regional Variations in Alaska and Russia by Ground-Based and Satellite-Based Methods, 2002 through 2014 // *Intern. J. Geosciences*. 2015. Vol. 6. P. 12–41.
17. *Njoku E.G.* AMSR Land Surface Parameters. Surface Soil Moisture, Land Surface Temperature, Vegetation Water Content. Algorithm theoretical basis document / Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology, 1999. 47 p.

18. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. Gap analyses by variable or by type of mission. 2017. URL: <https://www.wmo-sat.info/oscar/gapanalyses?variable=96>.
19. O'Neill P., Chan S., Njoku E., Jackson T., Bindlish R. Soil moisture active passive (SMAP) algorithm theoretical basis document Level 2 and 3 soil moisture (passive) data products / Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology, 2014. 77 p.
20. Schwank M., Mätzler C., Wiesmann A., Wegmüller U., Pulliainen J., Lemmetyinen J., Rautiainen K., Derksen K., Toose P., Drusch M. Snow Density and Ground Permittivity Retrieved from L-Band Radiometry: A Synthetic Analysis // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol. 8. No. 8. P. 3833–3845.
21. Status of the Global Observing System for Climate (GCOS-195), October 2015 / World Meteorological organization. 2015. URL: http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/GCOS-195_en.pdf.
22. Wang J.R., Schmugge T.J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1980. Vol. 18. P. 288–295.
23. Wang J.R., Choudhury B.J. Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4 GHz frequency // J. Geophysical Research. 1981. Vol. 86. P. 5277–5282.
24. WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2015 / World Meteorological Organization. WMO-No. 1167. Chairperson, Publications Board, 2016. P. 28.
25. Ye N., Walker J.P., Guerschman J., Ryu D., Gurney R.J. Standing water effect on soil moisture retrieval from L-band passive microwave observations // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 169. P. 232–242.
26. Zhou J., Dai F., Zhang X., Zhao S., Li M. Developing a temporally land cover-based look-up table (TL-LUT) method for estimating land surface temperature based on AMSR-E data over the Chinese landmass // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. Vol. 34. P. 35–50.

First application of Russian Meteor-M2 satellite for remote sensing of moisture and temperature of the tundra soil

**K.V. Muzalevskiy¹, Z. Ruzicka¹, I.V. Savin¹, M.G. Zahvatov², V.V. Goncharov³, A.Kh. Sariev³,
A.Yu. Karavaysky¹**

¹ *L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru*

² *Siberian Center of SRC "Planeta", Novosibirsk 630099, Russia*

³ *Scientific Research Institute of Agriculture and Environment of the Arctic
Norilsk 663302, Russia*

This paper presents the results of remote sensing of temperature and moisture of thawed tundra soil on two test sites of the Taimyr Peninsula using polarimetric observations of the brightness temperature at a frequency of 10.7 GHz by the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M2 satellite. The footprints of the MTVZA-GY radiometer were chosen in the areas of Norilsk and Khatanga cities on the Taimyr Peninsula. The study covers the period from January 1 to December 31, 2015. The retrieving method of soil temperature and soil moisture is based on solving an inverse problem by minimizing the norm between observed and calculated values of the brightness temperature. The calculation of the brightness temperature was carried out using a semi-empirical model of microwave emission, the parameters of which were previously calibrated on the test areas of Norilsk and Khatanga cities, as well as using permittivity model of tundra soil with a high content of organic matter. The permittivity model of tundra soil was created in laboratory conditions using methods of dielectric spectroscopy and soil samples, which were taken at a test area close to Norilsk city. The root-mean-square error between the retrieved and measured values of soil temperature (soil moisture) were no more than 6.5 °C (0.06 cm³/cm³). The obtained results indicates the prospect of using polarimetric observations of the brightness temperature at a frequency of 10.7 GHz by the MTVZA-GY radiometer on Russian Meteor-M2 satellite to measure the surface temperature and moisture of the Arctic tundra soil.

Keywords: Meteor-M, microwave radiometry, model of soil microwave emission, soil temperature, soil moisture, the Arctic zone

*Accepted: 29.08.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-100-118*

References

1. *Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. V 2-kh tomakh* (Evaluative report on climate changes and its consequences on the territory of the Russian Federation. In two volumes). Moscow: Rosgidromet, 2008. Vol. 1, pp. 230–291, <http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/index00.htm/>.
2. Al-Yaari A., Wigneron J.P., Ducharne A., Kerr Y., de Rosnay P., de Jeu R., Govind A., Al Bitar A., Albergel C., Munoz-Sabater J., 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, pp. 181–195.
3. Basharinov A., Shutko A., Simulation studies of the SHF radiation characteristics of soils under moist conditions, *NASA Technical Translation*, 1975, TT F-16.
4. Bircher S., Demontoux F., Razafindratsima S., Zakharova E., Drusch M., Wigneron J.-P., Kerr Y.H., L-Band Relative Permittivity of Organic Soil Surface Layers — A New Dataset of Resonant Cavity Measurements and Model Evaluation, *Remote Sens.*, 2016, Vol. 8, No. 12, pp. 1–17.
5. Chukhlantsev A.A., *Microwave radiometry of vegetation canopies*, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2006, 287 p.
6. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayas M.A., Microwave dielectric behavior of wet soil — Part II: Dielectric mixing models, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1985, Vol. GE-23, pp. 35–46.
7. ESA Data User Element. GlobCover Map. 2017. http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php.
8. Gill P.E., Murray W., Wright M.H., *Practical optimization*, London: Academic Press, 1981, 401 p.
9. Jones L.A., Kimball J.S., McDonald K.C., Chan S.T.K., Njoku E.G., Oechel W.C., Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 7, pp. 2004–2018.
10. Kerr Y.H., Al-Yaari A., Rodriguez-Fernandez N., Parrens M., Molero B., Leroux D., Bircher S., Mahmoodi A., Mialon A., Richaume P., Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 180, pp. 40–63.
11. Koike T., *Description of the GCOM-W1 AMSR2. Soil Moisture Algorithm Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 Algorithms*, Japan Aerospace Exploration Agency, Earth Observation Research Center, 2013, 119 p.
12. Mironov V.L., Kerr Y.H., Kosolapova L.G., Savin I.V., Muzalevskiy K.V., A Temperature-Dependent Dielectric Model for Thawed and Frozen Organic Soil at 1.4 GHz, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, No. 9, pp. 4470–4477.
13. Mironov V.L., Kosolapova L.G., Fomin S.V., Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, No. 7, pp. 2059–2070.
14. Mironov V.L., Savin I.V., Karavavsky A.Y., Dielectric model in the frequency range 0.05 to 15 GHz at temperatures –30°C to 25°C for the samples of organic soils and litter collected in Alaska, Yamal, and Siberian Taiga, *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Beijing, 2016, pp. 2684–2687.
15. Mitnik L.M., Cherny I.V., Mitnik M.L., Chernyavskii G.M., Kuleshov V.P., Baranyuk A.V., The MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M no. 2 satellite: the first 10 months in an orbit, calibration of data and retrieval of geophysical parameters, *Abstract Intern. Symposium “Atmospheric Radiation and Dynamics“ (ISARD – 2015)*, Saint-Petersburg-Petrodvorets, 2015, pp. 23–25.
16. Muskett R.R., Romanovsky V.E., Cable W.L., Kholodov A.L., Active-Layer Soil Moisture Content Regional Variations in Alaska and Russia by Ground-Based and Satellite-Based Methods, 2002 through 2014, *International Journal of Geosciences*, 2015, Vol. 6, pp. 12–41.
17. Njoku E.G., *AMSR Land Surface Parameters. Surface Soil Moisture, Land Surface Temperature, Vegetation Water Content. Algorithm theoretical basis document*, California Institute of Technology, 1999, 47 p.
18. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. Gap analyses by variable or by type of mission, 2017, URL: <https://www.wmo-sat.info/oscar/gapanalyses?variable=96>.
19. O’Neill P., Chan S., Njoku E., Jackson T., Bindlish R., *Soil moisture active passive (SMAP) algorithm theoretical basis document Level 2 and 3 soil moisture (passive) data products*, California Institute of Technology, 2014, 77 p.
20. Schwank M., Mätzler C., Wiesmann A., Wegmüller U., Pulliainen J., Lemmetyinen J., Rautiainen K., Derksen K., Toose P., Drusch M., Snow Density and Ground Permittivity Retrieved from L-Band Radiometry: A Synthetic Analysis, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, No. 8, pp. 3833–3845.
21. http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/GCOS-195_en.pdf.
22. Wang J.R., Choudhury B.J. Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4 GHz frequency, *J. Geophysical Research*, 1981, Vol. 86, pp. 5277–5282.
23. Wang J.R., Schmugge T.J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 1980, Vol. 18, pp. 288–295.
24. WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2015, World Meteorological Organization, WMO-No. 1167, Chairperson, Publications Board, 2016, pp. 28.
25. Ye N., Walker J.P., Guerschman J., Ryu D., Gurney R.J., Standing water effect on soil moisture retrieval from L-band passive microwave observations, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 169, pp. 232–242.
26. Zhou J., Dai F., Zhang X., Zhao S., Li M., Developing a temporally land cover-based look-up table (TL-LUT) method for estimating land surface temperature based on AMSR-E data over the Chinese landmass, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, Vol. 34, pp. 35–50.