

Спектральные и поляризационные особенности многолетней динамики радиотеплового излучения системы атмосфера-тундра по данным радиометров МТВЗА-ГЯ и AMSR-E

А.Г. Гранков¹, А.А. Мильшин¹, О.К. Чернобровина², И.В. Черный³

¹Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, пл. Ак. Введенского, д.1, г. Фрязино Московской области 141190, amilshin@list.ru

²Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, olga@mgul.ac.ru

³Научно-технологический центр "Космонит" ОА "Российские космические системы". 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, icherny@cpi.space.ru

Представлены экспериментальные среднемесячные данные радиоизлучения тундры в сантиметровом и миллиметровом диапазоне. Исходными данными служат измерения яркостных температур (ЯТ) тундры радиометром AMSR-E на частотах 6.9, 18.7 и 36.5 ГГц за 2002 - 2011 гг. и радиометром МТВЗА-ГЯ на частотах 10.6, 18.7 и 36.7 ГГц за период 2014 – 2017 гг. Рассмотрены сезонные вариации поляризационного контраста, коэффициента поляризации, коэффициента отношения и дискриминанта Фишера радиоизлучения тундры на глобальных масштабах.

Results of experimental monthly data of tundra emission at centimeter and millimeter band are submitted. The original data are measurements of brightness temperatures (BT) of the tundra using AMSR-E radiometer at frequencies of 6.9, 18.7 and 36.5 GHz for 2002 - 2011 years and MTVZA-GYA radiometer at frequencies of 10.6, 18.7 and 36.7 GHz for 2014 - 2017 years. Seasonal variations of polarization contrast, polarization index, relation coefficient and Fischer discriminant of tundra radio emission on a global scale are considered.

Введение

Основной целью наших исследований является поиск индикаторов фазового состояния поверхности тундры (мерзлое состояние, таяние, безморозное состояние и замерзание) по данным спутниковых пассивных СВЧ измерений.

В работе [1] отмечается, что время максимального промерзания грунтов (как и время их протаивания) в сезонном и многолетнем ходе заметно запаздывает относительно изменения температуры на поверхности грунтов. Для изучения фазовых особенностей пространственно-временной динамики радиотеплового излучения тундры в работах [2-4] была рассмотрена сезонная и многолетняя динамика радиотеплового излучения тундры в западном и восточном полушариях по данным радиометра AMSR-E на частотах 6.9, 18.7 и 36.5 ГГц. Пространственное распределение тундры по полушария приводится в работе [3]. Аналогичные исследования были выполнены с использованием данных радиометра МТВЗА-ГЯ на частотах 10.6, 18.7 и 36.7 ГГц за период 2014-2017 гг. [5, 6]. Основными факторами, по данным моделирования, определяющими сезонный ход яркостных температур в дециметровом и сантиметровом диапазонах, являются пространственно-временные вариации влажности и температуры верхнего слоя почвы. Экспериментальные данные [2-6] указывают на более сложный механизм формирования радиотеплового излучения, он определяется фазовыми изменениями состояния поверхности тундры в течение года. В работах [2-6] были получены интегральные оценки средних и максимальных значений ЯТ, скв ЯТ и коэффициента вариаций ЯТ на трех частотах и двух поляризаций, осредненные по всей площади тундры в обоих полушариях. Данные анализа сезонной динамики указывают на различия в механизме формирования радиотеплового поля

тундры в западном и восточном полушарии. Изменение фазового состояния тундры (таяние и замерзание) наиболее сильно проявляется на частоте 6.9 и 10.6 ГГц. Радиотепловое поле на горизонтальной поляризации наиболее чувствительно к изменению физических параметров системы атмосфера-тундра.

В настоящей работе, так же как в работах [2-6], рассматривается взаимосвязь изменения фазового состояния поверхности тундры с радиотепловым излучением среды на глобальных масштабах. В качестве индикаторов изменения фазового состояния тундры P^M используются поляризационный контраст PC, коэффициент поляризации PI, коэффициент PR=18H/36V, дискриминант Фишера D. Индикатор определяется как:

$$P^M = \frac{1}{S_{E,W}} \int_{S_{E,W}} p^M(s) ds,$$

индекс M означает среднемесячное значение параметра, $S_{E,W}$ - площадь тундры в восточном или западном полушарии, $p^M(s)$ - значение параметра в пикселе 25x25 км.

Сезонные вариации поляризационного контраста, коэффициента поляризации радиотеплового излучения тундры

На рис.1 представлен годовой ход поляризационного контраста измеренных яркостных температур $PC = T_V^B - T_H^B$ на частотах 6.9 (06V, 06H), 18.7 (18V, 18H) и 36.5 (36V, 36H) ГГц. Здесь V, H – соответственно вертикальная и горизонтальная поляризации. Рассмотрим кривые ТВП (East)– тундры восточного полушария. Наибольшие сезонные изменения контраста около 9К наблюдаются на каналах 18VH и 36VH, на канале 06VH изменения составляют около 6.5 К. Причем для этого канала отметим два сезонных экстремума – положительный в мае и отрицательный в октябре.

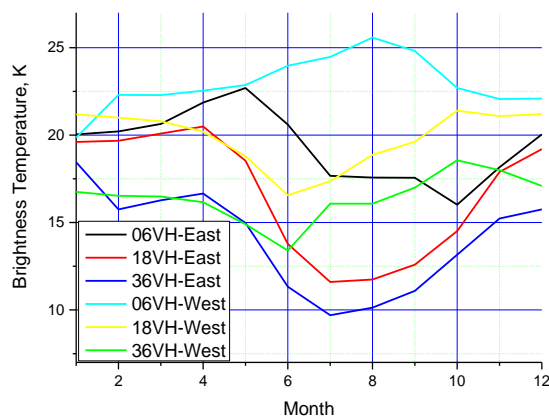


Рис.1. Спектры поляризационного контраста. Годовой ход по данным радиометра AMSR-E за период 2002-2011 гг.

Для ТЗП (West) – тундра западного полушария наблюдается инверсия сезонной зависимости контраста в низкочастотном канале 06VH с максимумом в августе. Вариации поляризационного контраста растут с уменьшением частоты наблюдения от 17К в канале 36VH до 25К в канале 06VH.

На рис.2 представлены аналогичные зависимости для радиометра МТВ3А-ГЯ. Угол зондирования у МТВ3А-ГЯ составляет 65 градусов, что существенно больше угла зондирования радиометра AMSR-E – 53 градуса. Величина поляризационного

контраста более чем в два раза больше аналогичных значений на рис.1 Для всех кривых, кроме 06VH в ТЗП, характерен плавный сезонный ход с минимумом контраста в летний период (незамерзшее состояние почвы). Для ТЗП наблюдается инверсия сезонной зависимости контраста в низкочастотном канале 10VH с максимумом в сентябре.

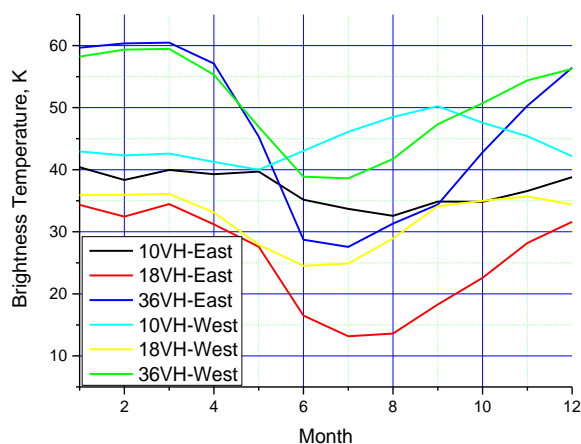


Рис.2. Спектры поляризационного контраста. Годовой ход по данным радиометра МТВЗА-ГЯ за период 2014-2017 гг.

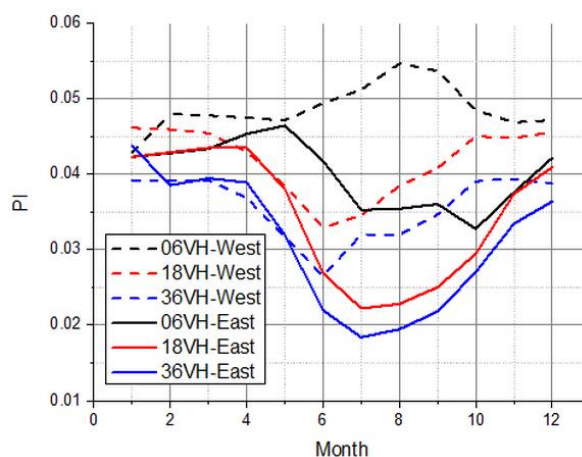


Рис.3. Спектры коэффициента поляризации PI. Годовой ход по данным радиометра AMSR-E за период 2002-2011 гг.

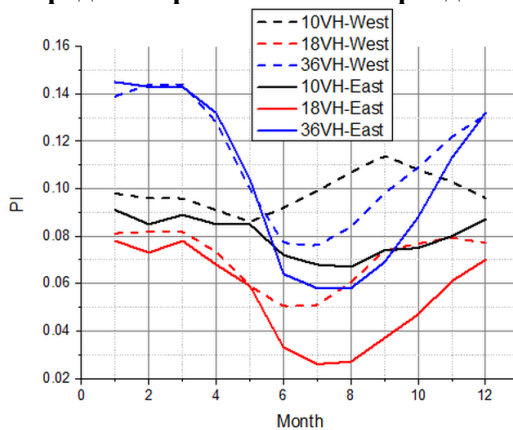


Рис.4. Спектры коэффициента поляризации PI. Годовой ход по данным радиометра МТВЗА-ГЯ за период 2014-2017 гг.

На рис.3, 4 представлены многолетние сезонные вариации среднемесячных значений PI западной и восточной частей тундры. PI определяется как:

$$PI = \frac{T_V^B - T_H^B}{T_V^B + T_H^B}$$

и характеризует поляризационные свойства излучаемой среды – системы атмосфера-тундра. PI является производным параметром от поляризационного контраста. Поэтому вид кривых на рис.1 и 3, 2 и 4 является подобным.

Наибольшее значение PI наблюдается в период декабрь-март, исключение составляет канал 06VH в ТЗП. PI снижается по величине в период таяния/замерзания и имеет наименьшее значение в неморозный период. В ТЗП PI имеет наибольшее значение в неморозном состоянии в августе для каналов 06VH и в сентябре для каналов 10VH. Величина сезонных вариаций расчет с увеличением частоты СВЧ радиометра.

Сезонные вариации коэффициента отношения и дискриминант Фишера радиотеплового излучения тундры

В работе [7] при рассмотрении границ замерзания и таяния авторы обнаружили хорошую дневную и ночную корреляцию ЯТ на 37 ГГц с температурой почвы осенью 1984 г. Это позволило в дальнейшем использовать отношение $PR = T_{18H}^B / T_{36V}^B$ как дискриминант границы таяния/замерзания. PR приблизительно можно считать коэффициентом излучения системы атмосфера-тундра на канале 18H. На рис.5 приведена зависимость годового хода PR. В ТВП излучение тундры в мерзлом состоянии (декабрь-апрель) близко к излучению черного тела, по мере таяния и появления жидкой влаги в почве тундры, коэффициент PR на частоте канала 18H уменьшается до 0.946 в период июнь-сентябрь. Затем величина PR снова растет при замерзании тундры. В ТЗП сезонный ход имеет аналогичную зависимость с несколько меньшим значением PR.

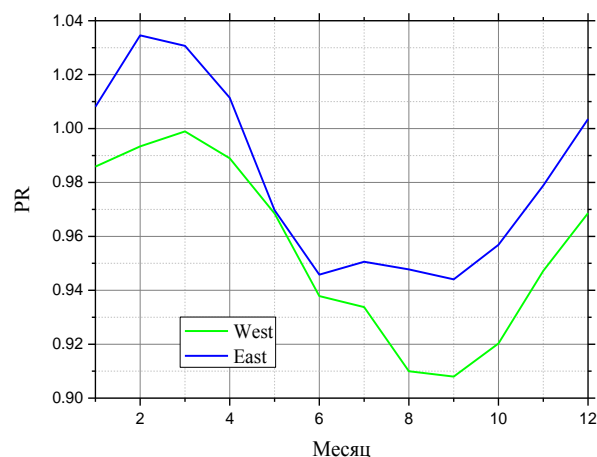


Рис.5. Годовой ход PR=18H/36V по данным радиометра AMSR-E за период 2002-2011 гг.

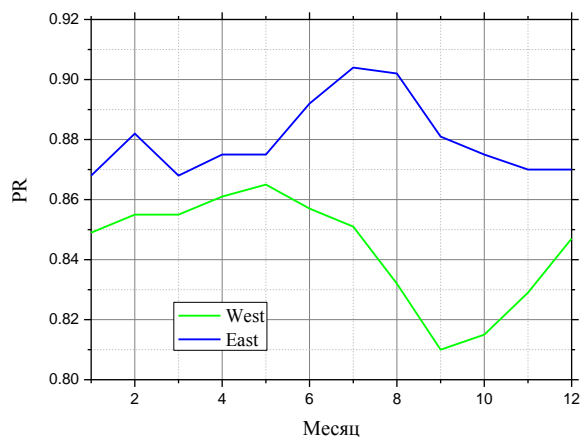


Рис.6. Годовой ход $PR=18H/36V$ по данным радиометра МТВЗА-ГЯ за период 2014-2017 гг.

На рис.6 представлен годовой ход PR по данным измерений радиометром МТВЗА-ГЯ. Для ТЗП зависимость имеет аналогичный ход, как и на рис.5. Для ТВП наблюдается инверсия хода PR.

Совершенствование индикатора таяния и замерзания PR нашло свое развитие в работах китайских ученых [8, 9]. Массив данных измерений радиометром AMSR-E за 2003 – 2010 гг. над территорией вечной мерзлоты в Китае площадью около 215000 км² был подвергнут линейному дискриминантному анализу Фишера. Были получены следующие дискриминантные функции D_T - таяние и D_F - замерзание, коррелирующие с данными полевых измерений температуры и влажности почвы:

$$D_T = 1.55T_{36V}^{BT} + 86.33 \frac{T_{18H}^{BT}}{T_{36V}^{BT}} - 242.41$$

$$D_F = 1.47T_{36V}^{BT} + 91.69 \frac{T_{18H}^{BT}}{T_{36V}^{BT}} - 226.77$$

При таянии $D_T > D_F$, а при замерзании $D_F > D_T$.

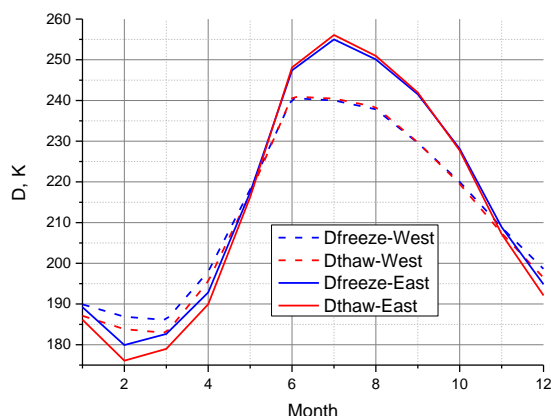


Рис.7. Годовой ход Df, Dt по данным радиометра AMSR-E за период 2002-2011 гг.

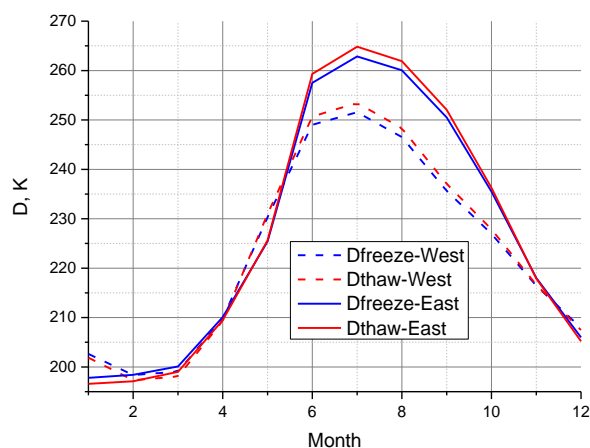


Рис.8. Годовой ход D_f , D_t по данным радиометра МТВ3А-ГЯ за период 2014-2017 гг.

На рис.7 показана сезонная зависимость среднемесячных значений дискриминанта для тундры по данным радиометра AMSR-E. Для ТВП таяние наступает во второй декаде мая, а промерзание начинается в середине сентября. Для ТЗП таяние наступает в третьей декаде мая, а промерзание – в первой декаде сентября.

Рассмотрим сезонный ход дискриминанта на примере данных радиометра МТВ3А-ГЯ, рис.8. Для ТВП таяние наступает во второй декаде мая, а промерзание начинается в третьей декаде октября. Для ТЗП таяние наступает во второй декаде мая, а промерзание – в первой декаде ноября. Мы видим существенное различие (запаздывание) в начале фазы замерзания по данным МТВ3А-ГЯ по сравнению с данными AMSR-E. Это еще раз подтверждает правило, что численные оценки, полученные для данных AMSR-E, не работают корректно с данными МТВ3А-ГЯ.

Заключение

В работе были использованы суточные ЯТ из архивных данных радиометра AMSR-E за период 2002 - 2011 гг. и радиометра МТВ3А-ГЯ за период 2014 - 2017 гг. Были обработаны данные AMSR-E на частотах 6.9, 18.7 и 36.5 ГГц и данные МТВ3А-ГЯ на частотах 10.6, 18.7 и 36.7 ГГц на горизонтальной и вертикальной поляризации для тундры в западном и восточном полушарии.

Получены сезонные среднемесячные оценки поляризационного контраста, коэффициента поляризации, коэффициента отношения и дискриминант Фишера для трех частот по всей площади тундры в обоих полушариях за указанные выше периоды.

Анализ сезонной динамики радиотеплового излучения тундры с учетом поляризационных и спектральных отличий указывает на различия в механизме формирования радиотеплового поля тундры в западном и восточном полушарии.

Радиотепловое поле на горизонтальной поляризации наиболее чувствительно к изменению физических параметров системы атмосфера-тундра.

Поляризационные параметры тундры имеют выраженный годовой ход. Поляризационный контраст и коэффициент поляризации данных МТВ3А-ГЯ более чем в два раза превышает аналогичные данные AMSR-E.

Набольшие различия данных AMSR-E и МТВ3А-ГЯ проявляются в сезонном ходе коэффициента отношения.

Поляризационный контраст, коэффициент поляризации, коэффициент отношения и дискриминант Фишера могут быть использованы как индикаторы фазового состояния поверхности тундры.

Мы благодарим центр NSIDC и НТЦ Космонит за предоставленные спутниковые данные ЯТ радиометров AMSR-E и МТВЗА-ГЯ.

Литература

1. Шполянская Н.А.. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. Москва-Ижевск: 2010. - 200 с.
2. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. Внутригодовая динамика радиотеплового излучения тундры по данным радиометра AMSR-E // Труды РНТОРЭС им. А.С.Попова. Серия: Инженерная экология. Выпуск: VIII. Москва 2015. - С.29-34
3. Гранков А. Г., Мильшин А. А. Сезонная динамика радиотеплового излучения тундры в сантиметровом диапазоне по данным спутникового радиометра AMSR-E // Межотраслевой институт «Наука и образование». Ежемесячный научный ж-л. 2015. 8(15). - С.50-55
4. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. Многолетняя динамика радиотеплового излучения системы атмосфера-тундра по данным радиометра AMSR-E // Доклады РНТОРЭС им. А.С.Попова. Серия: Проблемы экоинформатики. Выпуск: XII. Москва, 6-8 декабря 2016. - С. 94-98.
5. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К., Ямпольская Е.А. Статистические особенности многолетней динамики радиотеплового излучения системы атмосфера-тундра в микроволновом диапазоне // VII Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. –Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВЛГУ, 2017. –465 С. ISSN 2304-0297 (CD-ROM). - С.95-100.
6. Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К., Черный И.В., Ямпольская Е.А. Фазовые особенности сезонной динамики радиотеплового излучения системы атмосфера-тундра по данным радиометра МТВЗА-ГЯ спутника МЕТЕОР-М №2 // Тезисы докладов. 15 Всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2017 г. - С.377.
7. Zuerndorfer B.M., England A.W., Dobson M.C. and Ulaby F.T. Mapping freeze/thaw boundaries with SMMR data // Agricultural and Forest Meteorology, 52. 1990. - P.199-225.
8. Zhao T. J. et al. A new soil freeze/thaw discriminant algorithm using AMSR-E passive microwave imagery // Hydrol. Process., Vol. 25, No. 11. 2011. - P. 1704–1716.
9. Linna Chai, Lixin Zhang, Xiaoran Lv, Zhenguo Hao, and Shuzhen Liu. An Investigation Into the Feasibility of Using Passive Microwave Remote Sensing to Monitor Freeze/Thaw Erosion in China // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, Vol. 8. No.9. 2015. - P.4460-4469.