

УДК 528.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

А. А. Швецов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Получена 21 мая 2012 г.

Аннотация. Рассматриваются принципиальные возможности пассивного дистанционного зондирования в миллиметровой области спектра с использованием спектральных особенностей атмосферного излучения для определения рассеивающих свойств и термодинамической температуры поверхностного слоя Земли, а также идентификации природных объектов.

Ключевые слова: микроволны, дистанционное зондирование, миллиметровые волны, земные покровы, альbedo, индикатриса рассеивания, радиометрия.

Abstract. Principal possibilities of passive remote sounding in millimeter wavelength region for determine of scattering characteristics and thermodynamic temperature of Earth's surface top layer and also identification of natural objects by using of spectral features of atmospheric incident radiation are considered.

Keywords: remote sensing, microwave, remote sensing, millimeter wave, Earth cover, surface albedo, scattering indicatrix, radiometry.

Введение

Микроволновое пассивное зондирование, в миллиметровом диапазоне длины волн всё более широко используется для решения задач дистанционного зондирования поверхности Земли в интересах метеорологии, гидрологии, охраны окружающей среды и т.п., а так же в системах микроволнового радиовидения и пассивной навигации по радио тепловым полям.

Пассивное зондирование земной поверхности в миллиметровом диапазоне имеет очевидные преимущества, такие как более высокое угловое решение и/или меньшие размеры антенных систем по сравнению с аналогичными системами сантиметрового диапазона и более слабую зависимость от погодных условий, чем в оптическом и инфракрасном диапазонах. Однако ряд особенностей формирования миллиметрового излучения земных покровов, среди которых значительная временная изменчивость яркостных температур земных покровов и их взаимных контрастов, а, следовательно, и меньшая стабильность радиояркостного изображения ландшафта [1] может существенно снижать информативность зондирования. С другой стороны, наличие спектральных особенностей в нисходящем атмосферном излучении (линии и полоса излучения молекулярного кислорода и линии водяного пара) предоставляет уникальные возможности для выделения более устойчивых, чем яркостная температура излучательных и рассеивающих характеристик покрова, а также получения дополнительной информации о физическом состоянии его поверхностного слоя [2]. В работе рассматриваются принципиальные возможности пассивного дистанционного зондирования в миллиметровой области спектра, для оценки ряда характеристик рассеяния и термодинамической температуры верхнего слоя покрова с использованием спектральных особенностей нисходящего излучения атмосферы. Этот метод позволяет не только одновременно определять такие характеристики поверхности, как альbedo, форму индикатрисы и термодинамическую температуру, но также и с большей надежностью различать и идентифицировать природные объекты, в пространстве несколько параметров.

Цель работы

Цель данной работы - оценка возможностей многочастотного пассивного зондирования в миллиметровой области спектра для одновременного

измерения альbedo, параметров индикатрисы рассеивания, и термодинамической температуры земных покровов. Выполнена оценка точности одновременного восстановления трех параметров излучательных характеристик их поверхностного слоя: альbedo, ширины индикатрисы рассеивания и термодинамической температуры по результатам дистанционному зондированию на нескольких частотах 2,5 мм молекулярной линии кислорода в направлении надира.

Основные соотношения

Тепловое излучение поверхности Земли на частоте ν_i в общем случае включает две составляющие: его собственное излучение, определяемое коэффициентом излучения $k(\nu_i)$ и термодинамической температурой его эффективно излучающего слоя (скин-слоя) T , а так же рассеянным на его поверхности и в объеме нисходящим излучением атмосферы. Интенсивность излучения поверхности, выраженная в яркостных температурах $T_b(\nu_i)$ в приближении Релея-Джинса равна

$$T_b(\nu_i, \theta, \varphi) = k(\nu_i, \theta, \varphi)T + A(\nu_i, \theta, \varphi)\tilde{T}(\nu_i, \theta, \varphi), \quad (1)$$

где альbedo $A(\nu_i) = 1 - k(\nu_i)$ связано с двунаправленным спектральным коэффициентом отражения $\rho(\nu_i, \theta, \varphi, \theta', \varphi')$:

$$A(\nu_i, \theta, \varphi) = \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi/2} \rho(\nu_i, \theta, \varphi, \theta', \varphi') \cos \theta' \sin \theta' d\theta'. \quad (2)$$

Определим индикатрису, рассеивания поверхности как

$$f(\nu_i, \theta', \varphi', \nu_i, \theta, \varphi) = \rho(\nu_i, \theta', \varphi', \nu_i, \theta, \varphi) / A(\nu_i, \theta, \varphi), \quad (3)$$

где θ', φ' и θ, φ — зенитный и азимутальный углы падающего и рассеянного (принимаемого) излучения, соответственно, и $\tilde{T}_a(\nu_i, \theta, \varphi)$ — усредненная по индикатрисе рассеивания яркостная температура атмосферы (рассеянная компонента, излучения, нормированная на альbedo):

$$\tilde{T}(\nu_i, \theta, \varphi) = \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi/2} T_a(\nu_i, \theta', \varphi') f(\nu_i, \theta', \varphi', \nu_i, \theta, \varphi) \cos \theta' \sin \theta' d\theta', \quad (4)$$

где $T_a(\nu_i, \theta', \varphi')$ — яркостная температура нисходящего излучения атмосферы.

Нисходящее излучение плоскопараллельной или сферически слоистой атмосферы не зависит от азимутального угла и в отсутствие взвешенных в атмосфере рассеивающих частиц не поляризовано, поэтому уравнение (4) может быть переписано в виде

$$\tilde{T}_a(\nu_i, \theta, \varphi) = 2\pi \int_0^{\pi/2} T_a(\nu_i, \theta') \bar{f}(\nu_i, \theta', \theta, \varphi) \cos \theta' \sin \theta' d\theta', \quad (5)$$

где

$$\bar{f}(\nu_i, \theta', \theta, \varphi) = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} f(\nu_i, \theta', \varphi', \theta, \varphi) d\varphi', \quad (6)$$

индикатриса рассеяния поверхности, усредненная по азимутальному углу.

Как можно видеть из выражений (1-6), излучение покрова зависит от нескольких параметров: эффективно излучающего слоя покрова термодинамической температуры скин-слоя, его альбедо, усредненной по азимуту индикатрисы рассеяния, а также от падающего на него излучения атмосферы. В большинстве случаев для естественных покровов в миллиметровом диапазоне длин волн \bar{f} , а значит и $\tilde{T}_a(\nu_i, \theta, \varphi)$ не зависят также и от азимутального угла наблюдения (отражения) φ

Следует учесть следующие особенности формирования миллиметрового излучения земных покровов: сравнительно слабую зависимость от частоты величины альбедо и формы индикатрисы рассеяния, и напротив, наличие в атмосферном излучении узких спектральных особенностей, связанных с сильными линиями водяного пара и молекулярного кислорода.

Если имеются измерения излучения поверхности и падающего на неё излучения атмосферы на нескольких частотах ν_i ($i = 1..m$, $m \geq 3$) с различными оптическими толщами и, следовательно, с различными $\tilde{T}(\nu_i)$ в

диапазоне частот достаточно узком, чтобы можно было считать \bar{f} , A и ρ приближенно не зависящими от частоты, тогда из системы m уравнений типа (1) возможно найти альбедо, термодинамическую температуру, и оценить некоторые параметры индикатрисы рассеяния покрова. Для того чтобы исключить слагаемое, связанное с собственным излучением покрова (которое не зависит в узком диапазоне частот постоянно) преобразуем систему из m уравнений в систему из $m - 1$ уравнений, взяв их взаимные разности:

$$T_b(\nu_i) - T_b(\nu_{i+1}) = A [\tilde{T}_a(\nu_i) - \tilde{T}_a(\nu_{i+1})], \quad i = 1 \dots m - 1. (7)$$

Уравнения (7) представляют в разностном виде интегральную связь спектра излучения поверхности и формы индикатрисы рассеяния

$$T_b(\nu_i) - T_b(\nu_{i+1}) = 2\pi A \int_0^{\pi/2} \bar{f}(\theta, \theta', \varphi) [T_a(\nu_i, \theta') - T_a(\nu_{i+1}, \theta')] \cos \theta' \sin \theta' d\theta'. (8)$$

Яркостная температура атмосферы считается известной (полученной из измерений) функцией частоты и зенитного угла. Физическими предпосылками возможности нахождения индикатрисы рассеяния являются зависящие от частоты направленные свойства нисходящего излучения атмосферы. Система уравнений (7) может быть решена тем или иным способом; для этого форма индикатрисы должна быть параметризована. В результате решения системы (7) могут быть найдены величина альбедо и $m - 2$ параметра индикатрисы рассеяния (например, её ширина и др.), а затем из уравнения (5) и (1) может быть получена термодинамическая температура покрова.

В качестве примера рассмотрим случай зондирования в надир, а индикатрису рассеяния возьмем в форме однопараметрического семейства функций

$$\bar{f}(\theta, \theta') = (n + 2) \cos^n(\theta) \cos^n(\theta'). \quad (9)$$

Тогда, $n = 0$ соответствует случаю ортотропного рассеяния (закон Ламберта), а зеркально отражающая горизонтальная поверхность характеризуется значением $n \rightarrow \infty$. Далее для оценок мы будем рассматривать плоскопараллельную изотермическую модель атмосферы с температурой T_0 и оптической толщиной в зените τ_0 , для которой яркостная температура, в направлении зенитного угла θ' равна:

$$T_a(\nu_i, \theta') = T_0 \left[1 - \exp(-\tau_0(\nu_i) / \cos \theta') \right]. \quad (10)$$

Тогда $\tilde{T}(\nu_i)$ рассчитывается по формуле (4). Заметим, что $\tilde{T}(\nu_i)$ для целых значений n может быть выражена через интегральные показательные функции с индексом $n + 3$:

$$\tilde{T}(\nu_i, n) = T_0 \left\{ 1 - (n + 2) E_{n+3}[\tau_0(\nu_i)] \right\}. \quad (11)$$

В общем случае n может принимать и не целые значения.

Оценки возможностей многочастотного метода зондирования

Используя аппроксимацию индикатрисы рассеяния в виде (9), была решена прямая задача рассеяния для различных полуширин индикатрисы рассеяния $\Delta\theta$. Для этого были рассчитаны спектры излучения поверхности с различными $\Delta\theta$.

На рис. 1 показаны результаты расчетов разности (контраста) между усредненными яркостными температурами $\tilde{T}(\tau_0)$ для горизонтальных поверхностей с различными полуширинами индикатрисы рассеяния $\Delta\theta = 0 \dots 90^\circ$ и яркостью ортотропно рассеивающей поверхностью. Показано, что наибольшая чувствительность яркостного контраста к изменениям ширины индикатрисы рассеяния имеет место для частот соответствующих оптическим толщам атмосферы в зените $\tau_0 \sim 0,4 \div 0,6$ Нп.

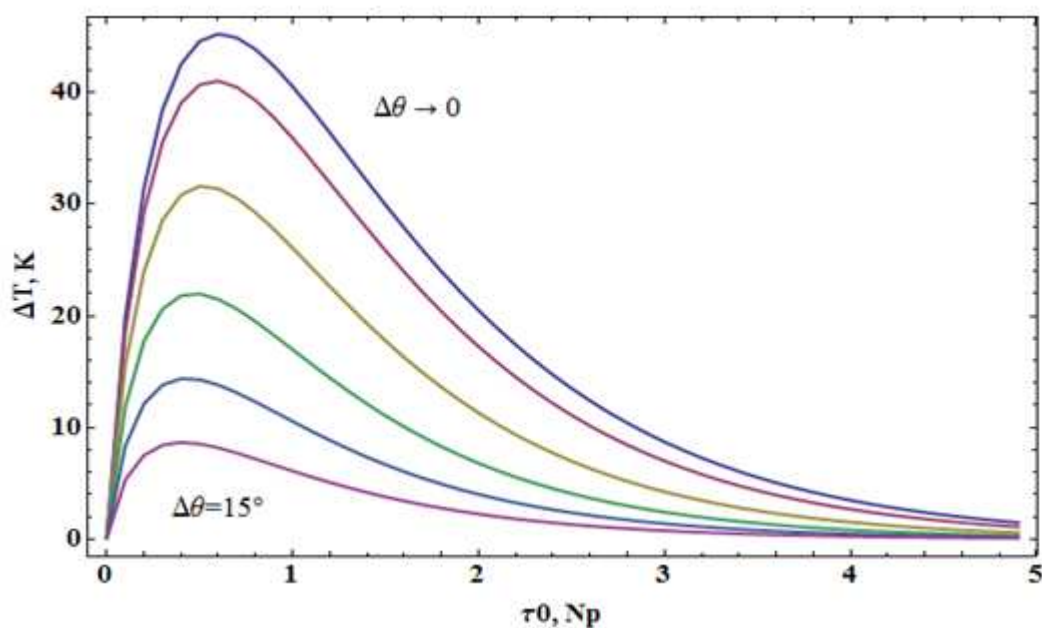


Рис.1. Яркостный контраст для различных полуширин индикатрисы рассеяния.

Наиболее подходящими спектральными особенностями для реализации этого метода являются области спектра вблизи линии молекулярного кислорода с резонансной длиной волны 2,5 мм и склоны 5-ти мм кислородной полосы, где имеют место резкие частотные изменения оптической толщи и интенсивности излучения атмосферы.

В качестве иллюстрации возможностей предлагаемого метода модельные расчеты были выполнены для атмосферной линии молекулярного кислорода 2,5 мм при зондировании в надир.

Расчеты спектра оптической толщи и интенсивности нисходящего излучения атмосферы были выполнены для типичных зимних условий средних широт с использованием эмпирической модели атмосферного поглощения [3]. На рис. 2 приведены результаты расчета спектра излучения, рассеянного, на горизонтальной поверхности, и нормированного на альбедо, соответствующие различным полуширинам индикатрисы $\Delta\theta$ от 0° (зеркальное отражение) до 90° (ортотропное рассеяния — закон Ламберта), с шагом 15° для линии молекулярного кислорода с резонансной частотой 118,75 Гц. Как видно из рисунка в результате рассеяния нисходящего атмосферного излучения на

поверхности, линия принимаемого радиометром излучения уширяется, тем большее, чем шире индикатриса рассеяния. Этот эффект и можно использовать для оценки ширины индикатрисы.

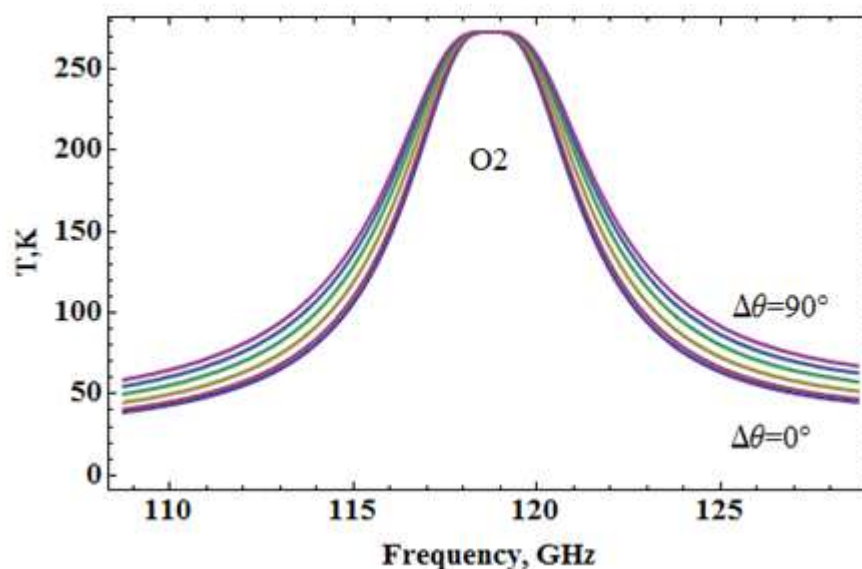


Рис. 2. Спектр рассеянного излучения для разных полуширин индикатрисы рассеяния.

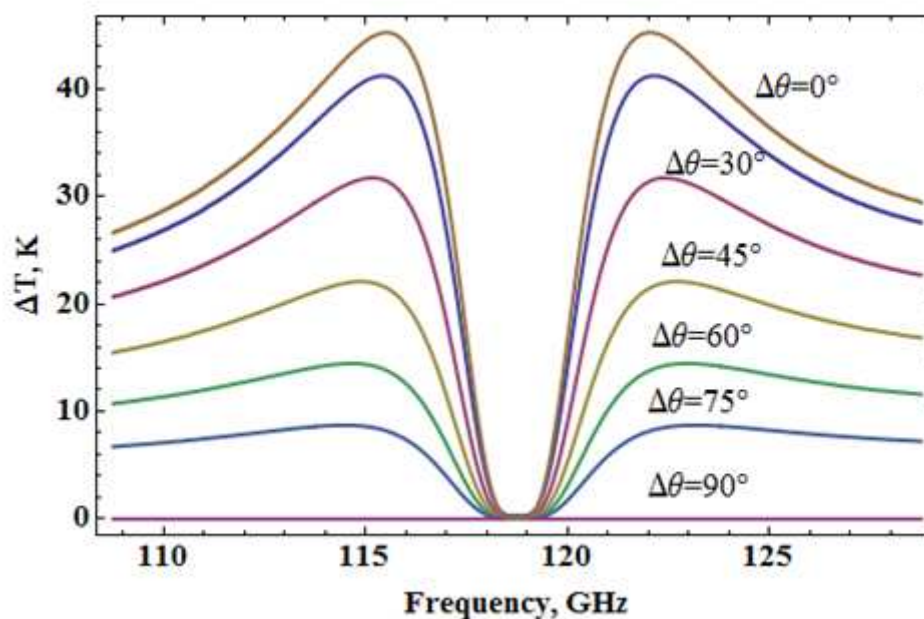


Рис. 3. Спектр яркостного контраста поверхностей с единичным альбедо.

На рис. 3 приведены частотные зависимости яркостного контраста поверхности с единичным альбедо $\Delta T_a(\nu, \Delta\theta) = \tilde{T}(\nu_i, 90^\circ) - \tilde{T}(\nu_i, 0^\circ)$ для

различных полуширин индикатрисы по отношению к ортотропно рассеивающей поверхности для линии молекулярного кислорода.

Как видно из рис. 3 яркостный контраст при фиксированном альбедо имеет максимальное значение в частотных диапазонах вблизи 115 ГГц и 124 ГГц. Эти участки спектра и выгодно использовать для оценки ширины индикатрисы.

Наибольшее значение альбедо в зимних условиях в миллиметровом диапазоне имеет глубокий сухой снежный покров [4]. Для него типичное значение $A \sim 0,5$ [5, 6]. Как видно из оценок (Рис. 3), минимально обнаружимая разница в полуширине индикатрисы рассеяния по отношению к полуширине для ортотропно рассеивающей поверхности, соответствующая приращению яркостной температуры в 1 К (уверенно обнаружимому современными радиометрами при отношении сигнал/шум ~ 10 и чувствительности 0,1 К) составляет около $2,5^\circ$ (для $A \sim 0,5$). Для покровов с меньшей величиной альбедо эта величина возрастает обратно пропорционально величине альбедо. В частности, при $A \sim 0,1$, типичной для суши в отсутствие снежного покрова чувствительность оценки полуширины индикатрисы ухудшается до величины 12,5 /К.

Для определения альбедо, напротив выгодно выбирать два частотных канала, где зависимость от ширины индикатрисы минимальна. Это частотные диапазоны вблизи центра линии и на её крыльях. Оценки показывают, что точность определения альбедо при фиксированной полуширине индикатрисы рассеяния в 90° и выборе одного канала зондирования вблизи центра линии, а другого на расстоянии 5 ГГц составляет около 10^{-3} . Это позволяет при отношении сигнал/шум ~ 10 различать порядка 50-ти градаций различных покровов в диапазоне альбедо 0–0,5, не зависимо от их термодинамических температур. Для более узких индикатрис точность определения альбедо и число обнаружимых градаций только возрастает.

Что касается точности определения самой термодинамической температуры, то она зависит от альбедо, и при $A \sim 0,5$ в приведенных выше

условиях и зондировании на 2-х выше указанных частотах составляет около 0,25 К; для покровов с $A \sim 0,1$ точность улучшается до 0,13 К.

При дистанционном зондировании в мм диапазоне часто предполагают, что на естественных покровах рассеивание подчиняется закону Ламберта. В некоторых условиях зондирования это предположение достаточно точно [7]. Однако при надирном зондировании некоторые поверхности (поверхность водоемов и многие искусственные покрытия) по своим рассеивающим свойствам могут сильно отличаться от этого закона. Поэтому желательно одновременно определять и индикатрису рассеяния. Для этого необходимо осуществлять зондирование в 3-х или большем числе частотных каналах.

Для того чтобы оценить потенциальную точность метода совместного определения 3-х параметров покрова было выполнено численное моделирование решения обратной задачи по измерениям его яркостной температуры на 3-х частотах, соответствующих величинам оптической толщи атмосферы близким к оптимальным: $\tau_0(\nu_1) = 0,2$, $\tau_0(\nu_2) = 0,6$ и $\tau_0(\nu_3) = 2$. Для этого к решению соответствующей прямой задачи для яркостных температур добавлялась случайная ошибка со стандартом отклонения 0.1 К. В результате решения обратной задачи восстанавливались три параметра: альbedo, полуширина индикатрисы рассеяния и термодинамическая температура эффективно излучающего слоя. В результате совместного решения системы 3-х уравнений (6) для средних величин $A \sim 0,5$, $\Delta\theta = 60^\circ$ и $T = 261\text{К}$ (типичных для сухого снежного покрова) получены средне квадратичные ошибки их восстановления. Они оказались равными 0,002, 2° , 0,3 К для A , $\Delta\theta$ и T , соответственно. Для покровов с малым альbedo $A = 0,1$ точность определения полуширины индикатрисы естественно ухудшается до $\sim 10^\circ$ (поскольку уменьшается рассеянная компонента излучения покрова), в тоже время ошибки в определении альbedo и термодинамической температуры становятся меньше.

Заключение

Таким образом, использование метода пассивного многочастотного дистанционного зондирования в миллиметровой области спектра [7, 8] в принципе дает возможность одновременного определения с приемлемой точностью трёх или более характеристик земного покрова: альbedo, термодинамической температуры его эффективно излучающего слоя, и параметров его индикатрисы рассеяния. Это дает возможность идентифицировать типы покровов в пространстве двух или более параметров, более стабильных, чем яркостная температура, а также осуществлять мониторинг физического состояния покровов, в частности его температуры и влажности (связанной с альbedo). Различия же в ширине индикатрисы рассеяния позволяют судить о степени шероховатости поверхности и/или о неоднородности его скин слоя.

Метод может быть применен и в других участках спектра миллиметровых и субмиллиметровых волн вблизи сильных линий водяного пара и полосы поглощения кислорода. При этом возможно получение аналогичной информации (о температуре, влажности и т.п.) других слоёв покрова, т.к. глубина формирования излучения в общем случае зависит от длины волны принимаемого излучения, и таким образом исследовать глубинный профиль этих параметров.

Метод может быть использован как для наземных измерений характеристик покровов труднодоступных участков земной поверхности, так и для зондирования с низколетящих воздушных носителей, а также для валидации космических систем дистанционного зондирования поверхности.

Работа поддержана лотом Министерство просвещения и науки Российская Федерация. Государственный контракт № 16.515.11.5077.

Литература

1. Kuznetsov I.V., Fedoseev L. I., Shvetsov A. A., Bistrov R.P. Radiation Properties of the Natural Objects in the Millimeterwave Region. //MSMV'07 Symposium Proceedings, Kharkov, Ukraine, June 2–530, vol. 1, 2007, pp. 430–432.
2. Shvetsov A.A., The Use of atmospheric molecular emission lines for passive remote sensing of the Earth surface. //2-nd International Conference on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology Beijing, China. Publishing house of electronics industry, 1992, T. 7.8, pp. 192–195.
3. Liebe H. J. , MPM- an atmospheric millimeter-wave propagation model. //Int. J. IR & MM Waves, vol. 10, No 6, 1989, pp. 631–650.
4. Stiles W. H , Ulaby F., The Active and Passive Microwave Response to Snow Parameters. 1. Wetness. //J. of Geophysical Research, vol. 85, No. C2, pp. 1037-1044, 1980.
5. Кузнецов И.В., Полова Н.К., Федосеев Л.И., Швецов А.А.. Яркость температура снежного покрова в диапазоне длин волн 1,3-0,87 мм. //III Всесоюзный симпозиум по ММ и СБММ волнам. Тезисы докладов. Горький. 1980.
6. Кузнецов И.В., Федосеев Л.И., Швецов А.А. Радиометрия снежного покрова в коротковолновой части миллиметрового диапазона. //Изв. высш. уч. зав.- Радиофизика, т. XL, № 9, 1997, с. 1113.
7. Швецов А.А., Коротаев Д.В., Федосеев Л.И. Дистанционное зондирование земных покровов в линии излучения кислорода 2.5 мм. //Изв. высш. уч. зав.- Радиофизика, Т. XLVIII, № 10-11, 2005, С. 905-916.
8. Швецов А.А. Использование многочастотной миллиметровой радиометрии для идентификации природных объектов. //XXII Всероссийская научная конференции Распространение радиоволн (РРВ – 22). Труды конференции. Ростов-на Дону – п. Лоо. 22-26 сентября 2008. С. 94 - 97.