

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОТРАЖЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ОТ ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЫ  
И БИСТАТИЧЕСКОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ  
ЛЕДОВОГО ПОКРОВА ОЗЕРА БАЙКАЛ

© 2022 г. П. Н. Дагуров<sup>а</sup>, А. В. Дмитриев<sup>а, \*</sup>, С. И. Добрынин<sup>а</sup>,  
Т. Н. Чимитдоржиев<sup>а</sup>, А. К. Балтухаев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

\*E-mail: dav@ipms.bscnet.ru

Поступила в редакцию 09.09.2022 г.

Разработан метод расчета коэффициента отражения сферической волны от двухслойной среды с плоскими границами раздела. Использован лучевой подход и поле находится путем суммирования волн, испытавших различное число преломлений и отражений. Установлено, что учет сферичности волны необходим при произвольном соотношении между высотой источника над слоем и толщиной слоя. Приведены результаты натурального исследования отражения микроволн L-диапазона от ледового покрова озера Байкал. Показано, что между расчетными и экспериментальными данными наблюдается хорошее согласие.

*Ключевые слова:* сферическая электромагнитная волна, слоистая среда, отражение, ледовый покров

DOI: 10.31857/S0205961422060057

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с современными климатическими флуктуациями все более возрастает актуальность методов дистанционного мониторинга окружающей среды и чрезвычайных ситуаций (Бондур и др., 2021; Bondur et al., 2021; Bondur et al., 2022). При этом отмечается общемировая тенденция по увеличению спутниковых радиолокационных систем мониторинга, что связано с возможностью выполнения съемки в любое время суток и практически при любой погоде, а также с высокой проникающей способностью волн микроволнового диапазона. Однако земные покровы неоднородны и с той или иной степенью точности их можно считать слоистыми. Поэтому возникает задача учета этой слоистости для почвы (Дагуров и др., 2012; Дагуров и др., 2016), снега (Дагуров et al., 2020; Nievinski, Larson, 2014; Rees, 2006), льда (Бордонский и др., 2011; Rees, 2006). Общие вопросы взаимодействия волн со слоистыми средами рассмотрены в монографиях (Бреховских, 1973; Борн, Вольф, 1973). Наиболее простым вариантом слоистой среды является двухслойная среда в виде однородного плоского слоя конечной толщины, лежащего на однородном полупространстве. Для отражения плоской волны от такой двухслойной структуры существует известное решение, основанное на суммировании всех волн, испытавших отражения. Обычно это решение и используется в различных задачах, связан-

ных с взаимодействием волн с двухслойной средой. Для сферической волны подобное геометрико-оптическое решение в литературе не обнаружено.

Цель работы заключается в нахождении выражения для коэффициента отражения сферических волн от двухслойной среды в приближении геометрической оптики и экспериментальной проверке расчетно-теоретических результатов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ОТ ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЫ

Геометрия задачи показана на рис. 1. В точке  $A$  в среде 1 в воздухе ( $\epsilon_1 = 1$ ) на высоте  $h_A$  над поверхностью слоя расположен точечный источник монохроматических волн с комплексной амплитудой  $\exp(ikr)/r$  ( $k$  – волновое число,  $r$  – расстояние от источника). В точке  $B$  на высоте  $h_B$  находится приемник излучения. Расстояние между антеннами вдоль верхней границы раздела равно  $d$ . Двухслойная среда образована диэлектрическим плоским слоем 2 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$  толщиной  $b$ , лежащим на полупространстве 3 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_3$ .

Найдем коэффициент отражения от двухслойной среды. Будем полагать, что выполняется условие  $h_A, h_B \gg \lambda$  ( $\lambda$  – длина волны) и используем лучевой подход. По аналогии с решением для плоской волны представим поле отраженной вол-

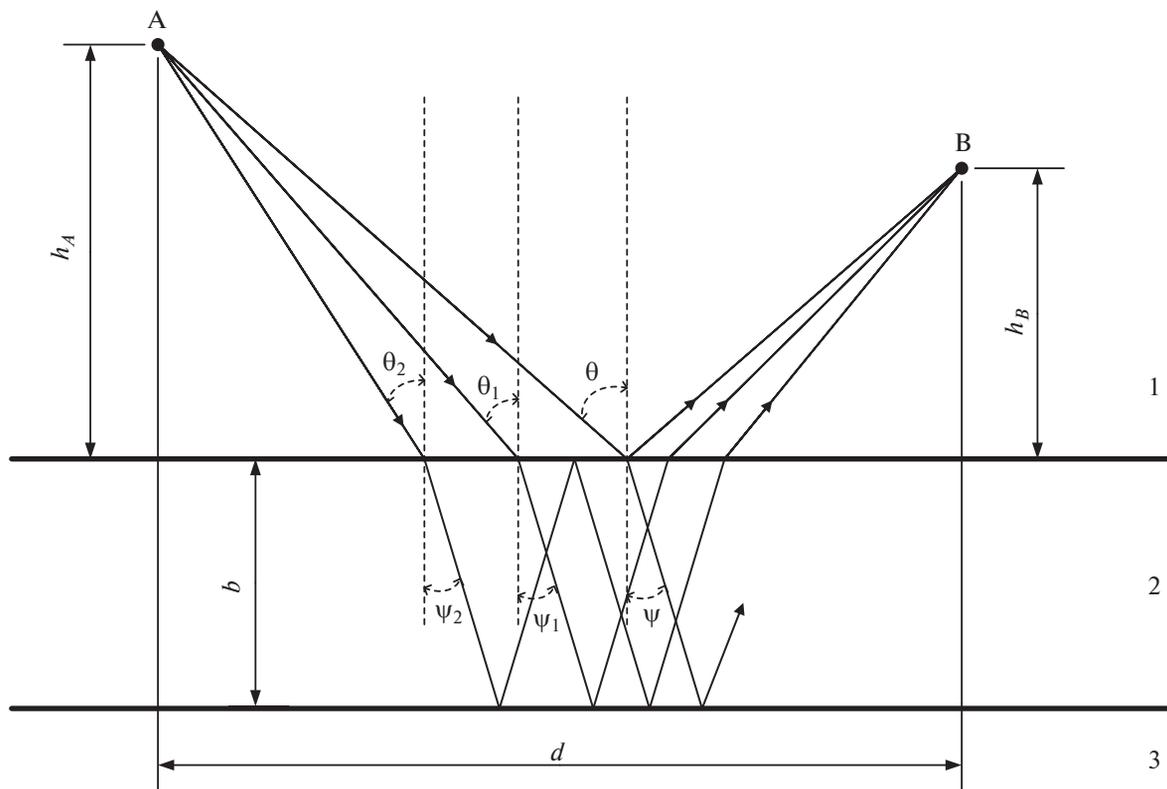


Рис. 1. Геометрия задачи об отражении сферической волны от двухслойной среды.

ны в точке наблюдения в виде суммы всех волн, испытавших различное число отражений и преломлений. На рис. 1 показаны три волны: волна, отраженная от верхней границы 12 между средами 1 и 2; волна, прошедшая (преломившаяся) в слой через границу 12, отразившаяся от нижней границы 23 и затем прошедшая границу 21; волна, прошедшая в слой и вышедшая из него после двух отражений от нижней границы и одного отражения от верхней границы. В отличие от плоской волны углы падения и, соответственно, преломления для разных волн в слое, а также и амплитуды этих волн имеют различные значения, что не позволяет суммировать волны простым способом, используя свойства геометрической прогрессии (Бреховских, 1973; Борн, Вольф, 1973).

Расстояние  $r_0$ , которое проходит волна, отраженная от верхней границы раздела под углом  $\theta$  и сам угол  $\theta$ , определяются соотношениями

$$r_0 = \frac{h_A + h_B}{\cos \theta}, \quad \theta = \arctg \frac{d}{h_A + h_B}. \quad (1)$$

Найдем угол  $\theta_j$ , под которым на слой падает  $j$ -ая волна, проходящая в слой и испытывающая затем  $j$  отражений от нижней границы слоя и  $(j - 1)$  отражений от верхней границы. Из геометрии задачи и закона Снеллиуса, связывающего угол падения  $\theta_j$  и угол преломления  $\psi_j$  для  $j$ -ой волны,

получим уравнения для определения  $\theta_j$ , которые решаются численно,

$$(h_A + h_B) \operatorname{tg} \theta_j + 2bj \operatorname{tg} \psi_j = (h_A + h_B) \operatorname{tg} \theta, \quad (2)$$

$$\psi_j = \arcsin \frac{\sin \theta_j}{\sqrt{\epsilon_2}}.$$

Расстояние  $r_j$ , пройденное рассматриваемой волной от точки  $A$  до точки  $B$  является суммой расстояний, пройденных волной в средах 1 и 2, а ее фаза  $\varphi_j$  определяется из соотношения

$$\varphi_j = k \left( \frac{h_A + h_B}{\cos \theta_j} + \frac{2jb\sqrt{\epsilon_2}}{\cos \psi_j} \right). \quad (3)$$

Поле  $j$ -ой волны имеет вид

$$E_j = T_{12j}(R_{23j})^j(R_{21j})^{j-1}T_{21j} \frac{\exp(j\varphi_j)}{r_{je}}, \quad (4)$$

где  $T_{12j}$  и  $T_{21j}$  – коэффициенты прохождения волны из первой среды во вторую, и из второй среды в первую, соответственно;  $R_{21j}$  и  $R_{23j}$  – коэффициенты отражения волны в слое 2 от первой среды и третьей среды, соответственно.

В формуле (4) через  $r_{je}$  обозначено эквивалентное расстояние, которое отличается от геометрического расстояния, пройденного  $j$ -ой волной. В монографии (Борн, Вольф, 1973) в приближении геометрической оптики получено выражение для амплитуды преломленной сферической волны в среде 2, которое можно представить в виде

$$|E| = \frac{1}{r_1} \sqrt{\frac{h_1 \operatorname{tg} \alpha_1}{h_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + h_2 \operatorname{tg} \alpha_2} \frac{h_1}{h_1 + \frac{h_2}{\sqrt{\varepsilon_2}} \left( \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \right)^3}} |T_{12}|. \quad (5)$$

В формуле (5)  $r_1$  – расстояние от источника до точки входа луча в среду 2;  $h_1, h_2$  – расстояния от источника и точки наблюдения во второй среде

до поверхности раздела, соответственно;  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы падения и преломления.

Обобщение формулы (5) с помощью метода зеркальных изображений на случай отражения от двухслойной среды, приводит к следующему выражению для эквивалентного расстояния

$$r_{je} = \frac{h_A}{\cos \theta_j} \sqrt{\frac{(h_A + h_B) \operatorname{tg} \theta_j + 2jb \operatorname{tg} \psi_j}{h_A \operatorname{tg} \theta_j} \frac{h_A + h_B + \frac{2jb}{\sqrt{\varepsilon_2}} \left( \frac{\cos \theta_j}{\cos \psi_j} \right)^3}{h_A}}. \quad (6)$$

Учитывая, что  $h_A, h_B \gg \lambda$ , далее в качестве коэффициентов отражения и прохождения через границу двух однородных сред будем использовать коэффициенты Френеля.

Коэффициенты отражения и прохождения в (4) согласно граничным условиям связаны соотношениями

$$T_{12j} = 1 + R_{12j}, \quad T_{21j} = 1 + R_{21j}, \quad R_{21j} = -R_{12j}.$$

Поле волны, отраженной от границы раздела сред 1 и 2 с коэффициентом отражения  $R_{12}$ , имеет вид

$$E_0 = R_{12} \frac{\exp(ikr_0)}{r_0}. \quad (7)$$

Используя соотношения (4) и (7), получим результирующий коэффициент отражения

$$R = \frac{E_0 + \sum_1^{\infty} E_j}{\exp(ikr_0)/r_0}. \quad (8)$$

Анализ показывает, что при удалении источника или приемника от границы раздела выражение (8) переходит в известную формулу для коэффициента отражения для плоской волны

$$R = \frac{R_{12} + R_{23} \exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2} \cos \psi)}{1 + R_{12} R_{23} \exp(2ik\sqrt{\varepsilon_2} \cos \psi)}. \quad (9)$$

Действительно, расчеты по формуле (8) показывают, что при большой высоте излучателя или приемника над поверхностью слоя по сравнению с толщиной слоя результаты для сферической волны совпадают с результатами для плоской волны. Однако, если высоты и толщина одного порядка, то использование формулы для плоской волны приводит к существенным ошибкам в определении коэффициента отражения. Отметим, что в формулах (8) и (9) поляризация излучения учтена в коэффициентах отражения  $R_{12}$  и  $R_{23}$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Для экспериментальной проверки теоретической модели и сравнения с результатами расчета

были проведены измерения отражения микроволн от ледового покрова озера Байкал. Предварительно толщина льда определялась с помощью бурения, ее величина составила 1.01 м. В эксперименте в качестве передающей и приемной антенн использовались измерительные рупорные антенны П6-23А с раскрытиями  $0.345 \times 0.260$  м. Центры раскрытов передающей и приемной антенн были установлены на высоте 1.6 м над поверхностью льда. Антенны были направлены на точку зеркального отражения от льда, т.е. измерительный комплекс представлял собой бистатический скаттерометр. Измерения проводились на частоте 1.78 ГГц. На данной частоте расстояние дальней зоны составляет 1.4 м, т.е. антенны находились в дальней зоне относительно друг друга. Развязка между уровнями измеряемой отраженной волны и прямой волны за счет диаграмм направленности антенн составляла не менее 30 дБ. Изменение угла падения производилось путем изменения расстояния между антеннами. Ширина диаграммы направленности составляла  $25^\circ$ .

На рис. 2 приведены экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента отражения микроволн  $R$  от угла падения в диапазоне углов  $\theta$  от  $30^\circ$  до  $45^\circ$ , полученные на частоте 1.78 ГГц при горизонтальной (ГП) и вертикальной (ВП) поляризациях. Измеренные значения показаны квадратами и треугольниками. При расчетах байкальский лед считался диэлектриком с диэлектрической проницаемостью 3.17 (Hoekstra, Delaney, 1974), мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости не учитывалась, поскольку она меньше  $10^{-4}$ ; комплексная диэлектрическая проницаемость воды принималась равной  $80 + i20$  (Hoekstra, Delaney, 1974). Расчеты проводились с учетом направленности антенн. Основной лепесток диаграммы направленности аппроксимировался гауссоидой. Расчеты показали, что результаты, полученные для направленной и ненаправленной антенн совпадают с графической точностью. Это объясняется следующим. Амплитуды  $j$ -ых волн быстро уменьшаются с увеличением значения  $j$  за счет увеличения пройденного волной расстояния

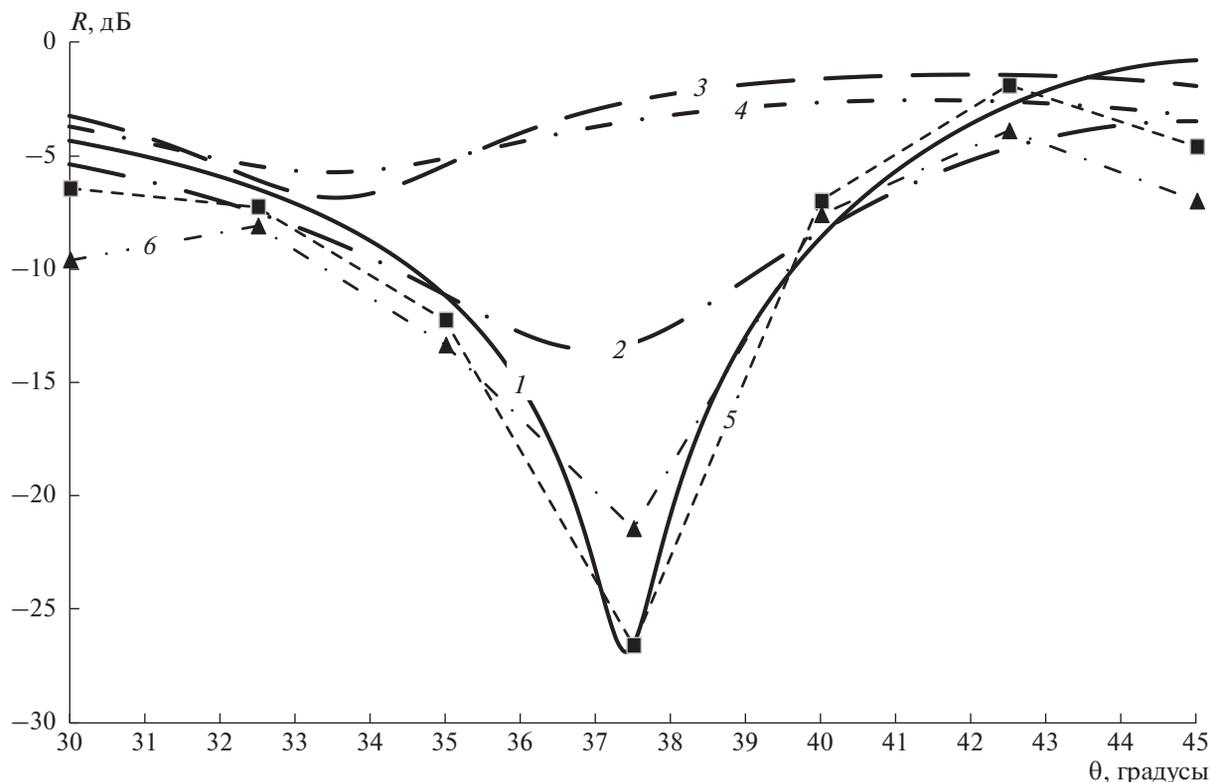


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения  $R$  от угла падения. 1 – ГП, 2 – ВП, сферическая волна (расчет); 3 – ГП, 4 – ВП, плоская волна (расчет); 5 – ГП, 6 – ВП, эксперимент.

и числа преломлений и отражений, поэтому учет даже одного члена в сумме формулы (8) обеспечивает достаточную точность вычислений. При угле падения  $\theta = 30^\circ$  вычисленные значения углов  $\theta_j$  составили:  $\theta_1 = 23.5^\circ$ ,  $\theta_2 = 19.1^\circ$ ,  $\theta_3 = 16.0^\circ$ ; при  $\theta = 45^\circ$  –  $\theta_1 = 37.7^\circ$ ,  $\theta_2 = 31.7^\circ$ ,  $\theta_3 = 27.0^\circ$ . Отсюда следует, что направления падения на лед волн  $E_1$  (угол падения  $\theta_1$ ) не выходили за пределы ширины диаграммы направленности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные результаты, приведенные на рис. 2, показывают существенную зависимость коэффициента отражения от угла падения, связанную с изменением условий интерференции для отраженной и преломленно-отраженных волн при изменении угла падения. В целом из представленных результатов можно сделать вывод об удовлетворительном согласии расчетных и экспериментальных данных, тогда как расчеты с использованием коэффициента отражения для плоской волны значительно отличаются. Некоторое расхождение расчетных и экспериментальных данных можно объяснить возможным влиянием неровности границ ледовой поверхности и связью антенн за счет бокового излучения вдоль прямой линии, соединяющей апертуры антенн.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физического материаловедения СО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Москва: Наука, 1973. 344 с.
- Бондур В.Г., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л. Космический мониторинг изменчивости площадей природных пожаров и эмиссий вредных примесей в атмосферу на территории различных регионов России за 20-летний период // Докл. РАН. Науки О Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 216–222.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739721100042>
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Поляризаационные аномалии микроволнового излучения и добавочные электромагнитные волны в деформируемых ледяных покровах // Журн. Технической Физики. 2011. Т. 81. № 9.
- Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Дымбрылов Ж.Б., Чимитдоржиев Т.Н. Влияние слоистой структуры влажности почвы на работу интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Изв. Высших Учебных Заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 8–2. С. 265–267.
- Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Добрынин С.И., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н. Радиолокационная интерферометрия сезонных деформаций почвы и фазовая модель обратного рассеяния микроволн двухслойной средой с

шероховатыми границами // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 585–591.

<https://doi.org/10.15372/AOO20160709>

*Bondur V., Chimitdorzhiev T., Dmitriev A., Dagurov P.* Fusion of SAR Interferometry and Polarimetry Methods for Landslide Reactivation Study, the Bureya River (Russia) Event Case Study // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 24. P. 5136.

<https://doi.org/10.3390/rs13245136>

*Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A.* Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series // Forests. 2022. V. 13. № 5. P. 814.

<https://doi.org/10.3390/f13050814>

*Dagurov P.N., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I.* Estimation of snow water equivalent from L-band radar in-

terferometry: simulation and experiment // Int. J. Remote Sens. 2020. V. 41. № 24. P. 9328–9359.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1798551>

*Hoekstra P., Delaney A.* Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies // J. Geophys. Res. (1896-1977). 1974. V. 79. № 11. P. 1699–1708.

<https://doi.org/10.1029/JB079i011p01699>

*Nievinski F.G., Larson K.M.* Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation-Part II: Application and Validation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2014. V. 52. № 10. P. 6564–6573.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2297688>

*Rees G.* Remote sensing of snow and ice. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 285 p.

## Spherical Wave Reflection from a Two-Layer Medium and Bistatic Microwave Sounding of the Lake Baikal Ice Cover

P. N. Dagurov<sup>1</sup>, A. V. Dmitriev<sup>1</sup>, S. I. Dobrynin<sup>1</sup>, T. N. Chimitdorzhiev<sup>1</sup>, and A. K. Baltukhaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

A method for calculating the reflection coefficient of a spherical wave from a two-layer medium with flat interface boundaries has been developed. The geometrical optics approach is used and the field is found by summing waves that have experienced a different number of refractions and reflections. It is established that taking into account the sphericity of the wave is necessary for an arbitrary ratio between the height of the source above the layer and the thickness of the layer. The results of a field study are presented of the reflection of L-band microwaves from the ice cover of Lake Baikal. It is shown that there is a good agreement between the calculated and experimental results.

*Keywords:* spherical electromagnetic wave, layered medium, reflection, ice cover

### REFERENCES

*Brekhovskikh L.M.* Volny v sloistykh sredakh (Waves in layered media). Moskva: Nauka, 1973. 344 p. (In Russian)

*Bondur V.G., Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L.* Kosmicheskii monitoring izmenchivosti ploschadei prirodnykh pozharov i emissii vrednykh primesei v atmosferu na territorii razlichnykh regionov Rossii za 20-letnii period (Satellite monitoring of variability of wildfire areas and harmful trace gas emissions into the atmosphere for various regions of Russia over a 20-year period) // Doklady RAS. Earth Sciences. 2021. V. 500. № 2. P. 216–222. (In Russian).

<https://doi.org/10.31857/S2686739721100042>

*Bordonskii G.S., Gurulev A.A., Krylov S.D., Orlov A.O., Tsyrenzhapov S.V.* Polyarizatsionnye anomalii mikrovolnovo izlucheniya i dobavochnye elektromagnitnye volny v deformiruemyykh ledyanykh pokrovakh (Polarization anomalies of microwave radiation and additional electromagnetic waves in deformable ice covers) // Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 2011. V. 81. № 9. P. 93–99. (In Russian).

*Born M., Wolf E.* Principles of Optics. Sixth Edition. Pergamon Press, 2013. 836 p.

*Dagurov P.N., Dmitriev A.V., Dymbrylov Zh.B., Chimitdorzhiev T.N.* Vliyanie sloistoi struktury vlazhnosti pochvy na rabotu interferometricheskikh radiolokatorov s sintezirovannoi aperturoi (The effect of the layered structure of soil moisture on the operation of interferometric radars with synthesized aperture) // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Fizika. 2012. V. 55. № 8–2. P. 265–267. (In Russian).

*Dagurov P.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I., Zakharov A.I., Chimitdorzhiev T.N.* Radiolokatsionnaya interferometriya sezonnykh deformatsii pochvy i fazovaya model' obratnogo

rasseyaniya mikrovoln dvukhsloinnoi sredoi s sherokhovatyimi granitsami (Radar interferometry of the soil's seasonal deformations and the phase model of backscattering of microwaves by a two-layer medium with rough boundaries) // Optika atmosfery i okeana. 2016. V. 29. № 7. P. 585–591. (In Russian).

<https://doi.org/10.15372/AOO20160709>

*Bondur V., Chimitdorzhiev T., Dmitriev A., Dagurov P.* Fusion of SAR Interferometry and Polarimetry Methods for Landslide Reactivation Study, the Bureya River (Russia) Event Case Study // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 24. P. 5136.

<https://doi.org/10.3390/rs13245136>

*Bondur V., Chimitdorzhiev T., Kirbizhekova I., Dmitriev A.* Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series // Forests. 2022. V. 13. № 5. P. 814.

<https://doi.org/10.3390/f13050814>

*Dagurov P.N., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I.* Estimation of snow water equivalent from L-band radar interferometry: simulation and experiment // Int. J. Remote Sens. 2020. V. 41. № 24. P. 9328–9359.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1798551>

*Hoekstra P., Delaney A.* Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies // J. Geophys. Res. (1896-1977). 1974. V. 79. № 11. P. 1699–1708.

<https://doi.org/10.1029/JB079i011p01699>

*Nievinski F.G., Larson K.M.* Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part II: Application and Validation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2014. V. 52. № 10. P. 6564–6573.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2297688>

*Rees G.* Remote sensing of snow and ice. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 285 p.