

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА
ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SMOS**

©2019 г. Д. А. Боярский^{1*}, А. Н. Романов², И. В. Хвостов², В. В. Тихонов^{1,3}, Е. А. Шарков¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

³Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

*E-mail: dboyarski@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

Приведены результаты сравнительного анализа яркостных температур, полученных спутником SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), и соответствующих им глубин промерзания почвы, измеренных на метеостанциях, расположенных на тестовых участках Кулундинской равнины. На основе ежедневных спутниковых измерений яркостных температур изучено влияние процессов промерзания почвы на микроволновое излучение подстилающей поверхности. С использованием модели микроволнового излучения плоскостной неоднородной, неизотермической среды выполнен теоретический расчет зависимости яркостной температуры почвы от глубины промерзания. В качестве входных параметров модели использовались реальные параметры почв Кулундинской равнины, а также климатические характеристики исследуемых областей, полученные на метеостанциях за этот же период. Из анализа спутниковых и полевых данных, а также модельных расчетов следует, что для оценки глубины промерзания почвы по ежедневным данным спутниковой микроволновой радиометрии необходимо знать дату начала замерзания почвенного покрова, а также диэлектрические характеристики мерзлой и незамерзшей почвы на тех участках, по которым выдается продукт SMOS по яркостной температуре. На основе спутниковых данных и модели микроволнового излучения почвы с верхним мерзлым слоем предложен способ определения глубины промерзания почвенного покрова.

Ключевые слова: Кулундинская равнина, сезонно-мерзлые почвы, глубина промерзания, яркостная температура, микроволновый диапазон

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-13>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач, решаемых методами дистанционного микроволнового зондирования, является определение глубины промерзания почвенного покрова. Получение информации о сезонных процессах замерзания и оттаивания почвенного покрова основано на яркостном контрасте между мерзлой и незамерзшей почвой. Интенсивность микроволнового излучения почвенного покрова с верхним мерзлым слоем зависит от соотношения между длиной волны излучения и толщиной этого слоя, а также от градиентов температуры и комплексной диэлектрической проницаемости в слое (Богородский и др., 1977; Njoku, Kong, 1977). В свою очередь комплексная диэлектрическая проницаемость почвы зависит от ее влажности, засоленности и гранулометрического состава (Боярский, Тихонов, 2003; Boyarskii et al.,

2002). Сезонные вариации яркостных температур подстилающей поверхности, связанные с замерзанием верхнего слоя почвы, затрудняют правильную интерпретацию спутниковых данных (Leroux et al., 2013). Влияние снежного покрова, растительности и шероховатости поверхности на отражательную способность почвы установлено на основе наземных измерений излучательных характеристик промерзающей почвы (Schwank et al., 2004). В зависимости от поляризации и угла наблюдения снежный покров может увеличивать или уменьшать интенсивность излучения подстилающей поверхности (Schwank et al., 2014).

Для расчета диэлектрических параметров мерзлых почв предложена модель эффективной диэлектрической проницаемости мерзлой почвы, учитывающая ее состав и содержание незамерзшей воды (Боярский, Тихонов, 1995; Боярский, Тихонов, 2003; Boyarskii et al., 2002).

Применяемая в настоящее время дистанционная оценка сезонного промерзания почвы в глобальных масштабах основана на использовании спутниковых данных в микроволновом диапазоне и установленных пространственно-временных пороговых значениях яркостных температур незамерзшей и мерзлой почв, измеренных при разных поляризациях и углах зондирования. Разработан алгоритм обнаружения начала замерзания почвы, основанный на изменении относительной разницы между яркостными контрастами почвенного покрова на горизонтальной и вертикальной поляризациях (Rautiainen et al., 2014). Из анализа наземных и спутниковых данных следует, что начало осеннего замерзания почвы может быть оценено по наблюдениям SMOS с точностью от 1 до 14 суток, в зависимости от применяемых дистанционных индикаторов замерзания и данных полевых измерений, используемых для сравнения (Rautiainen et al., 2016).

При замерзании и оттаивании поверхностного слоя почвы наблюдаются заметные различия между суточной и сезонной динамикой температур воздуха и почвы (Shati et al., 2018). Алгоритм классификации состояний поверхностного замерзания/оттаивания почвы основан на использовании индексов рассеяния, яркостных температур на вертикальной поляризации 37 ГГц и разности вертикальной и горизонтальной поляризаций на частоте 19 ГГц (Jin et al., 2009). Наблюдения за сезонно-мерзлыми и многолетнемерзлыми почвами ведутся со спутника SMAP (Soil Moisture Active Passive). Обнаружение процессов замерзания/оттаивания почвы с высоким разрешением 3 км возможно на основе использования спутниковых данных обратного рассеяния в L-диапазоне (Zhao et al., 2018).

Дистанционная оценка начала и продолжительности замерзания/оттаивания почвы в средних широтах основана на совместном анализе температуры почвы и максимальных/минимальных значений яркостных температур, измеренных в течение семи дней на частоте 37 ГГц (вертикальная поляризация) (Han et al., 2010). Разработан эмпирический метод оценки глубины промерзания по данным измерений на частотах 10,7, 19 и 37 ГГц при углах зондирования от 0° до 60° (Montpetit et al., 2018). На различии диэлектрических характеристик мерзлых и незамерзших почв в диапазоне 0,1–1 ГГц основан метод обнаружения мерзлых грунтов (Song et al., 2009).

С помощью временных рядов яркостных температур, измеренных со спутника SMOS на вертикальной и горизонтальной поляризации,

изучалась сезонная динамика процессов замерзания/оттаивания почвы на примере северной тундры (Kalantari et al., 2015). Фазовый переход почвенной влаги приводит к значительному изменению диэлектрической проницаемости мерзлого грунта из-за большой разницы между диэлектрическими проницаемостями жидкой воды и льда. В результате этого при замерзании происходит резкое увеличение излучательной способности, зависящее от влажности, структуры почвы и частоты излучения (Zhang et al., 2001, 2004).

В данной работе приведены результаты моделирования яркостной температуры почвенного покрова с верхним сезонно-мерзлым слоем в сравнении с яркостными температурами, определенными со спутника SMOS и соответствующими им глубинами промерзания почвы, измеренными на метеостанциях, расположенных на тестовых участках Кулундинской равнины. На основе моделей эффективной диэлектрической проницаемости мерзлой почвы и излучательной способности почвы с верхним мерзлым слоем предложен алгоритм определения глубины промерзания почвенного покрова.

ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

Исследования проводились на территории Алтайского края. Для оценки пространственного распределения яркостных температур T_{Br} подстилающей поверхности использовались данные спутника SMOS (продукт L1C) (Gutierrez, Castro, 2010). Погрешность определения T_{Br} изменялась от ± 3 К в центре до ± 6 К на краях полосы захвата шириной ~ 890 км. Спутниковая съемка исследуемой территории производилась около 7 и 21 часа местного времени на горизонтальной и вертикальной поляризации на частоте 1,41 ГГц. Разрешающая способность радиометра при зондировании под углом $42,5^\circ$ составляет величину порядка 45 км. Данные L1C привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4N9 (Sahr et al., 2003), исследуемые ячейки которой изображены на рис. 1. Линейный размер ячейки составляет ~ 16 км. Такое соотношение масштаба сетки и разрешающей способности радиометра обеспечивает корректное, с точки зрения критерия Найквиста, представление результатов измерений (Pinogi et al., 2008). При этом значение T_{Br} каждой ячейки площадью ~ 195 км² характеризует излучательную способность значительно большего участка (пикселя) подстилающей поверхности (площадью от 700 до 2000 км², в зависимости от угла зондирования), содержащего эту ячейку.

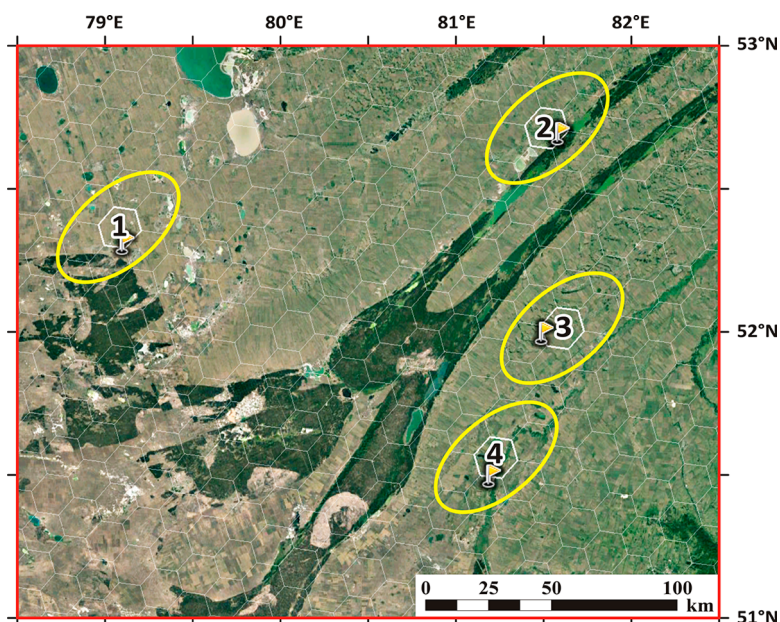


Рис. 1. Карта-схема исследуемой территории с фрагментом сетки ISEA 4Н9, тестовыми участками, метеостанциями и границами пикселей.

В соответствии с размерами геодезической ячейки и всего пикселя, в качестве основных объектов исследования были выбраны тестовые участки Кулундинской равнины (рис. 1), расположенные в степной и лесостепной зонах. Участки различались относительными долями площадей основных типов подстилающей поверхности, попадающих в пиксель спутникового радиометра. В первую очередь учитывались площади открытых водоемов, лесных массивов и почвенного покрова (табл. 1). Эти типы подстилающей поверхности характеризуются значительно отличающимися излучательными характеристиками, зависящими от температуры и солености воды (для открытой водной поверхности), температуры, биомассы и сплоченности деревьев (для древесной растительности), температуры, влажности и засоленности почвы (для почвенного покрова). Площади искусственных поверхностей в населенных пунктах

(металлические крыши домов, асфальтированные дороги) составляли менее 1% к суммарной площади пикселя. Из табл. 1 видно, что основным типом подстилающей поверхности, попадающей в пиксель, являлся почвенный покров, относительная площадь которого составляла 79–93%. При этом, во всех геодезических ячейках доля площади почвенного покрова превышала 90–95%.

На исследуемой территории распространены черноземные почвы, в основном распашанные, используемые в сельском хозяйстве, по гранулометрическому составу относящиеся к иловато-песчаным, пылевато-песчаным и иловато-пылеватым почвам (Татаринцев, 2008). Гумусовый горизонт достигает 80 см и более (Кауричев, Громько, 1974). Под гумусовым слоем располагается многометровая толща почвообразующих пород, преимущественно лессовидных суглинков древнеаллювиального

Таблица 1. Примерные площади основных ландшафтов в процентном отношении к площади пикселя

Номер участка	1	2	3	4
Метеостанция WMO_ID	36021	29928	36032	36034
Населенный пункт	Ключи	Мамонтово	Поспелиха	Рубцовск
DGG ID(v.4)	1056990	1062108	1060054	1058003
Лесные массивы	< 15%	< 10%	< 5%	< 5%
Водоемы	< 5%	< 10%	< 1%	< 5%
Почвенный покров	> 84%	> 79%	> 93%	> 89%
Населенные пункты	< 1%	< 1%	< 1%	< 1%

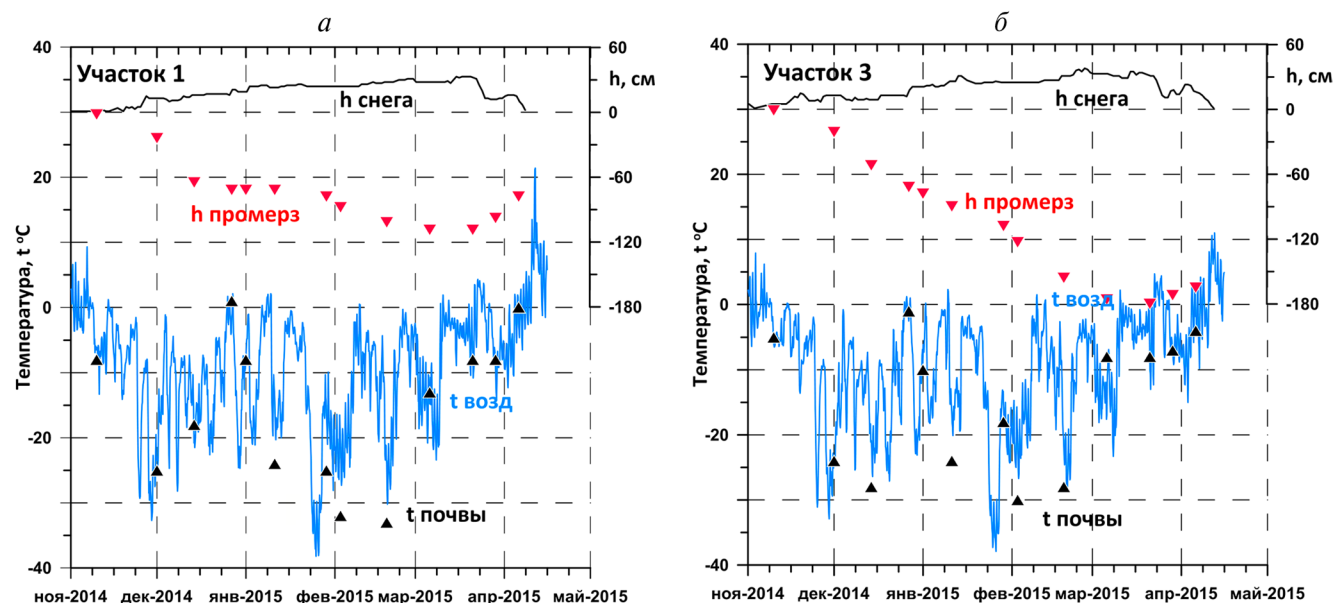


Рис. 2. Температура воздуха, температура поверхности почвы, высота снежного покрова и глубина промерзания почвы для двух исследуемых участков 1 — а и 3 — б.

и делювиального происхождения (нередко подстилаемых засоленными третичными породами) (Татаринцев, 2008).

Данные метеонаблюдений: температуры воздуха и поверхности почвы, высоты снежного покрова и глубины промерзания почвы для двух исследуемых участков приведены на рис. 2.

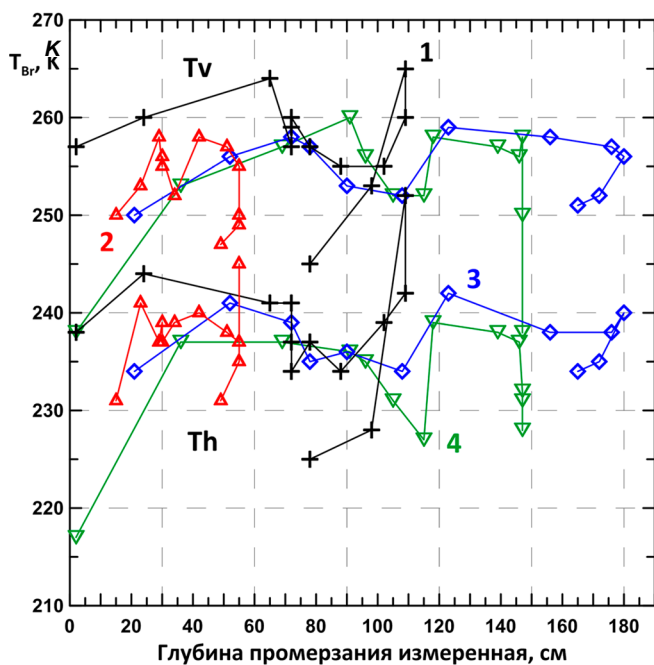


Рис. 3. Зависимости яркостной температуры (данные SMOS) от глубины промерзания почвы на тестовых участках (см. табл. 1): 1 — крест, 2 — треугольник вверх, 3 — треугольник вниз. Верхние кривые относятся к вертикальной поляризации, нижние — к горизонтальной.

Почва начинает промерзать в первой декаде ноября, когда температура воздуха становится отрицательной и в это же время появляется устойчивый снежный покров. Данные метеорологических наблюдений, включая термодинамические температуры, влажности почвы и снега, высоту снежного покрова взяты с сайта "Расписание Погоды" (<https://gr5.ru>). Глубина промерзания почвы определялась контактным способом (ГОСТ 24847–81) на метеостанциях, расположенных в исследуемых районах на территории, попадающей в геодезическую ячейку. Номера метеостанций, входящих во Всемирную метеорологическую организацию, и номера геодезических ячеек (DGG ID) приведены в таблице 1.

На рис. 3 приведены значения яркостных температур, измеренных на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях со спутника SMOS и соответствующая им глубина промерзания почвенного покрова, определенная контактным способом на ближайших к тестовым участкам метеостанциях. Численные значения яркостных температур, соответствующие им значения глубины промерзания и температуры поверхности почвы приведены в табл. 2.

Выраженная зависимость яркостной температуры от толщины мерзлого слоя существует только на начальной стадии промерзания почвы. При этом радиояркостные контрасты достигают 25 K для обеих поляризаций. Ясно, что это вызвано уменьшением диэлектрической проницаемости верхних слоев почвы при замерзании почвенной влаги. Из анализа данных следует, что одинаковые значения яркостных температур

Таблица 2. Значения яркостных температур на вертикальной (T_H) и горизонтальной (T_V) поляризациях, температура подстилающей поверхности ($T_{ПП}$), толщина сезонно-мерзлого слоя (h)

Дата измерений	1				2				3				4			
	T_H	T_V	$T_{ПП}$	h , см	T_H	T_V	$T_{ПП}$	h , см	T_H	T_V	$T_{ПП}$	h , см	T_H	T_V	$T_{ПП}$	h , см
10.11.2014	238	257	265	2	218	241	268	4	217	235	268	0	217	238	269	2
01.12.2014	244	260	248	24	231	250	245	15	234	250	249	21	237	253	248	36
14.12.2014	241	264	255	65	241	253	244	23	241	256	245	52	237	257	245	69
27.12.2014	241	257	274	72	237	258	273	29	239	258	272	72	236	260	272	91
01.01.2015	237	259	265	72	239	255	266	30	235	257	263	78	235	256	263	96
11.01.2015	234	260	249	72	237	256	246	30	236	253	249	90	231	252	249	105
29.01.2015	237	257	248	78	239	252	258	34	234	252	255	108	227	252	248	115
03.02.2015	234	255	241	88	240	258	245	42	242	259	243	123	239	258	244	118
19.02.2015	239	255	240	102	238	257	235	51	238	258	245	156	238	257	251	139
06.03.2015	242	260	260	109	237	255	261	55	238	257	265	176	237	256	262	146
21.03.2015	252	265	265	109	245	250	266	55	240	256	265	180	232	258	261	147
29.03.2015	228	253	265	98	235	249	269	55	235	252	266	172	228	238	266	147
06.04.2015	225	245	273	78	231	247	273	49	234	251	269	165	231	250	271	147

соответствуют разной глубине сезонного промерзания почвы. Это связано с интерференцией микроволнового излучения в мерзлом слое почвы, зависящей от соотношения между толщиной слоя и длиной волны регистрируемого микроволнового излучения, а также с резким различием диэлектрических характеристик мерзлой и незамерзшей почв (Боярский, Тихонов, 1995; Боярский, Тихонов, 2003; Song et al., 2009). Отметим, что скорости промерзания почвенного покрова различаются для исследованных участков в пределах от 0.4 до 2.3 см/сутки.

МОДЕЛЬ T_{Br}

Теоретический расчет зависимости яркостной температуры почвы от глубины промерзания выполнялся на основе модели микроволнового излучения плоскостойкой неоднородной, неизотермической среды (Клепиков, Шарков, 1983; Sharkov, 2003), адаптированной для почвенного покрова. Предполагалось, что излучающая система состоит из толстого слоя суглинистой породы (подпочвенный слой), над которым располагается слой почвы, еще выше которого находится толстый слой атмосферы (рис. 4). В зависимости от глубины промерзания, выделялось три конфигурации:

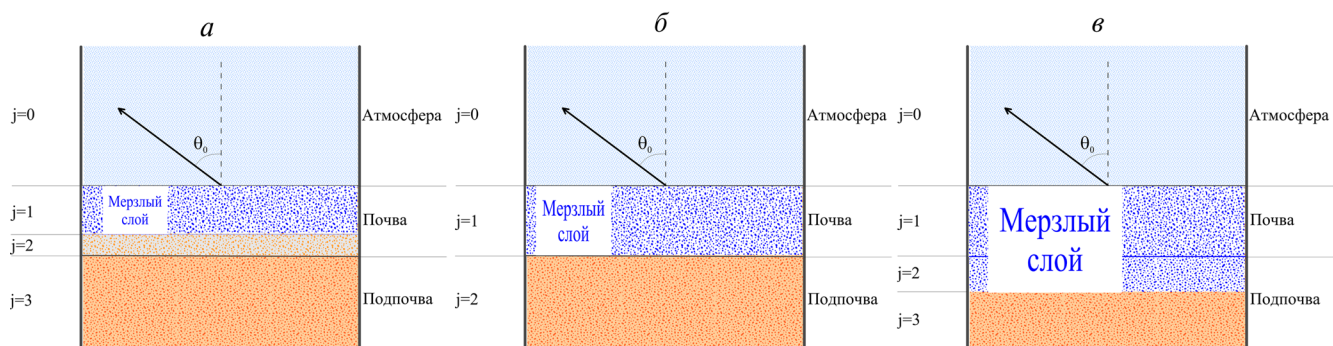


Рис. 4. Схема решаемой задачи: а — глубина мерзлого слоя меньше толщины почвы; б — глубина промерзания равна толщине слоя почвы; в — глубина промерзания больше толщины почвы.

1 — глубина мерзлого слоя меньше толщины почвы (рис. 4а); 2 — глубина промерзания равна толщине слоя почвы (рис. 4б); 3 — глубина промерзания больше толщины почвы (рис. 4в).

Яркостная температура такой системы, для случая а и в на рис. 4, определяется из выражений (Клепиков, Шарков, 1983; Sharkov, 2003):

$$\left. \begin{aligned}
 T_{Br}^v &= \sum_{j=1}^2 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times \left[(1 - \exp(-2\operatorname{Im} \psi_j)) \left(1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2 \right) + \right. \\
 &+ 4 \frac{\operatorname{Im} \psi_j}{\operatorname{Re} \psi_j} \operatorname{Re}(r_j^- \exp(i\psi_j)) \operatorname{Im}(\exp(i\psi_j)) \times \left. \left[\frac{|k_{z_j}|^2 - k_x^2}{|k_j|^2} \right] \frac{\operatorname{Re} Z_j}{\operatorname{Re} Z_0} + T_3 |W_3|^2 \frac{\operatorname{Re} Z_3}{\operatorname{Re} Z_0} \right], \\
 T_{Br}^h &= \sum_{j=1}^2 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times \left[(1 - \exp(-2\operatorname{Im} \psi_j)) \left(1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2 \right) + \right. \\
 &+ 4 \frac{\operatorname{Im} \psi_j}{\operatorname{Re} \psi_j} \operatorname{Re}(r_j^- \exp(i\psi_j)) \operatorname{Im}(\exp(i\psi_j)) \left. \frac{\operatorname{Re} Z_j}{\operatorname{Re} Z_0} + T_3 |W_3|^2 \frac{\operatorname{Re} Z_3}{\operatorname{Re} Z_0} \right],
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где верхний индекс у T_{Br} обозначает: v — вертикальную поляризацию, h — горизонтальную поляризацию; k_j — волновой вектор в слое j ; T_j — термодинамическая температура слоя j ; r_j^+ , r_j^- — коэффициенты отражения от верхней и нижней границы слоя j соответственно; ψ_j — набег фазы волны поперек слоя j , W_j — коэффициенты пропускания от внутренней стороны верхней границы слоя j на верхнюю границу слоистой среды (в нашем случае: граница «почва–атмосфера»); Z_j — волновой импеданс слоя j . Для схемы,

приведенной на рис. 4а, индекс j обозначает: 0 — свободное пространство (атмосферу); 1 — мерзлую почву; 2 — теплую почву; 3 — теплую подпочву. Для схемы на рис. 4в, индекс j обозначает: 0 — свободное пространство (атмосферу); 1 — мерзлую почву; 2 — мерзлую подпочву; 3 — теплую подпочву.

Для случая, представленного на рис. 4б, яркостная температура будет определяться из выражений:

$$\left. \begin{aligned}
 T_{Br}^v &= \frac{T_1 |W_1|^2}{|1 - r_1^- r_1^+ \exp(2i\psi_1)|^2} \times \left[(1 - \exp(-2\operatorname{Im} \psi_1)) \left(1 + |r_1^- \exp(i\psi_1)|^2 \right) + \right. \\
 &+ 4 \frac{\operatorname{Im} \psi_1}{\operatorname{Re} \psi_1} \operatorname{Re}(r_1^- \exp(i\psi_1)) \operatorname{Im}(\exp(i\psi_1)) \times \left. \left[\frac{|k_{z_1}|^2 - k_x^2}{|k_1|^2} \right] \frac{\operatorname{Re} Z_1}{\operatorname{Re} Z_0} + T_2 |W_2|^2 \frac{\operatorname{Re} Z_2}{\operatorname{Re} Z_0} \right], \\
 T_{Br}^h &= \frac{T_1 |W_1|^2}{|1 - r_1^- r_1^+ \exp(2i\psi_1)|^2} \times \left[(1 - \exp(-2\operatorname{Im} \psi_1)) \left(1 + |r_1^- \exp(i\psi_1)|^2 \right) + \right. \\
 &+ 4 \frac{\operatorname{Im} \psi_1}{\operatorname{Re} \psi_1} \operatorname{Re}(r_1^- \exp(i\psi_1)) \operatorname{Im}(\exp(i\psi_1)) \left. \frac{\operatorname{Re} Z_1}{\operatorname{Re} Z_0} + T_2 |W_2|^2 \frac{\operatorname{Re} Z_2}{\operatorname{Re} Z_0} \right],
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где индекс j равный 0 обозначает свободное пространство (атмосферу); 1 — мерзлую почву; 2 — теплую подпочву.

Характеристики каждого слоя находятся из следующих выражений:

$$W_j = \prod_{m=1}^j \frac{Z_{m-1}^{in+} + Z_{m-1}}{Z_{m-1}^{in+} + Z_m} \exp(i\psi_{m-1}), \quad Z_j^{in+} = Z_j \frac{Z_{j-1}^{in+} - iZ_j \operatorname{tg} \psi_j}{Z_j - iZ_{j-1}^{in+} \operatorname{tg} \psi_j}, \quad Z_j^{in-} = Z_j \frac{Z_{j+1}^{in-} - iZ_j \operatorname{tg} \psi_j}{Z_j - iZ_{j+1}^{in-} \operatorname{tg} \psi_j},$$

$$\psi_j = k_{z_j} h_j, \quad k_{z_j} = k_j \cos \theta_j, \quad k_x = k_0 \sin \theta_0, \quad k_j = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon_j}}{\lambda}, \quad \cos \theta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_j - \epsilon_0 \sin^2 \theta_0}{\epsilon_j}},$$

$$r_j^+ = \frac{Z_{j-1}^{in+} - Z_j}{Z_{j-1}^{in+} + Z_j}, \quad r_j^- = \frac{Z_{j+1}^{in-} - Z_j}{Z_{j+1}^{in-} + Z_j}, \quad Z_j = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_j} \cos \theta_j} & \text{— горизонтальная поляризация} \\ \cos \theta_j \\ \sqrt{\epsilon_j} & \text{— вертикальная поляризация} \end{cases}$$

где Z_j^{in+} — входной импеданс в слое j на нижней границе для волны, распространяющейся вверх; Z_j^{in-} — входной импеданс в слое j на верхней границе для волны, распространяющейся вниз; h_j — толщина слоя j ; λ — длина волны излучения; θ_0 — угол наблюдения; ϵ_j — комплексная диэлектрическая проницаемость слоя j .

трех видов частиц (песчаные, пылеватые и илистые). В модели учитывается присутствие в почве связанной воды, количество которой определяется концентрацией илистых (глинистых) частиц, а также пространственное распределение свободной воды в порах почвы.

Таким образом, излучение системы определяется термодинамической температурой и комплексной диэлектрической проницаемостью каждого слоя. Диэлектрические свойства каждого слоя зависят от его состава, температуры, влажности и других физических и структурных характеристик. Для расчета комплексной диэлектрической проницаемости почвы была использована модель, подробно изложенная в работах (Боярский, Тихонов, 1995; Боярский, Тихонов, 2003; Boyarskii et al., 2002). Согласно этой модели почва состоит из

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ T_{Br}

Модельный расчет был выполнен для четырех участков Кулундинской равнины. Сравнение модельного расчета и спутниковых данных для двух исследуемых участков приведено на рис. 5. На эти участки были получены данные спутника SMOS по яркостной температуре за период 2014–2015 гг. В качестве входных параметров модели использовались реальные параметры почв Кулундинской равнины (табл. 3) (Татаринцев,

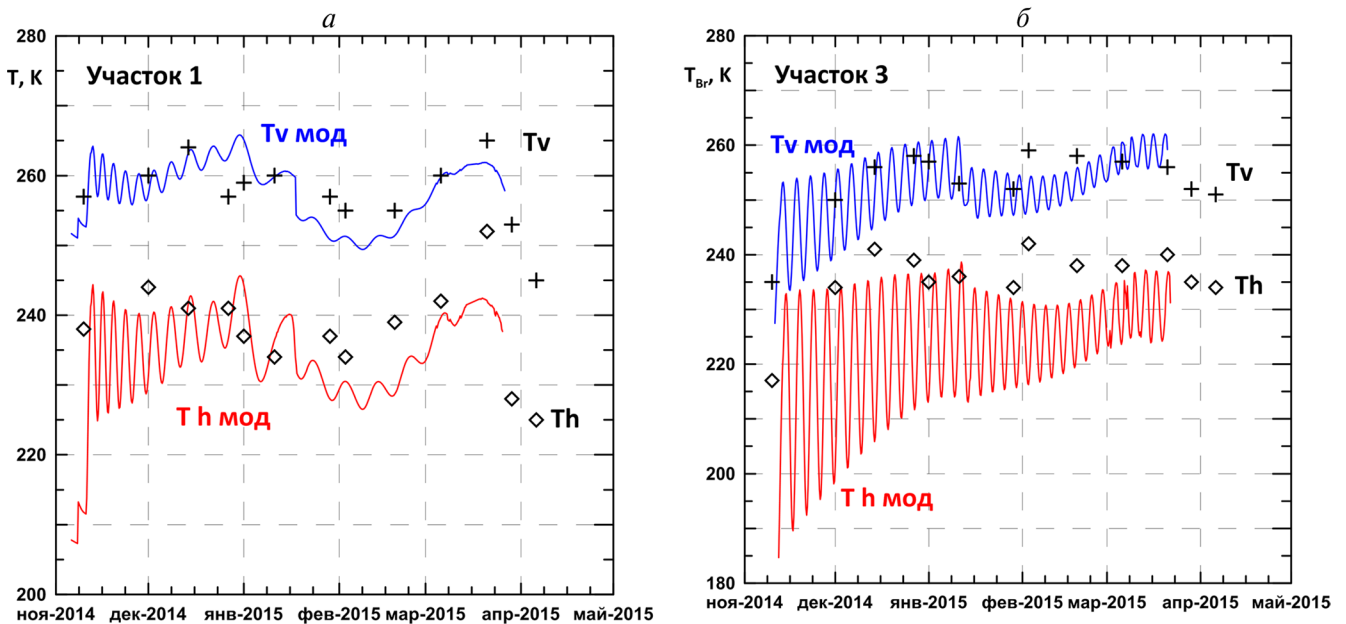


Рис. 5. Сезонные зависимости яркостной температуры на тестовых участках 1 — а и 3 — б, данные SMOS (значки) и модельный расчет (сплошные линии). Верхние кривые относятся к вертикальной поляризации, нижние — к горизонтальной.

Таблица 3. Физические параметры почвы, используемые для модельных расчетов

Номер участка	1	2	3	4
Метеостанция WMO_ID	36021	29928	36032	36034
Населенный пункт	Ключи	Мамонтово	Поспелиха	Рубцовск
Толщина слоя почвы, см	80	80	90	110
Плотность сухой почвы, г/см ³	1.18	1.18	1.5	1.45
Влажность почвы, см ³ /см ³	0.1	0.12	0.15	0.12
Соленость почвенной влаги, г/л	25	0.5	0	0

2008), а также климатические характеристики исследуемых участков, полученные на метеостанциях за этот же период.

При расчетах считалось, что теплый подпочвенный слой представляет собой влажную суглинистую почву (Татаринцев, 2008) с температурой 0.5 °С. Данные метеостанций по температуре поверхности почвы за весь период наблюдения усреднялись плавными функциями. Данные по глубине промерзания также были усреднены плавными зависимостями. Предполагалось, что мерзлый слой имеет эффективную температуру равную среднему значению между температурой поверхности в данный момент времени и температурой нижней границы мерзлого слоя (0 °С). При расчете яркостной температуры проводилось усреднение по толщине мерзлого слоя в пределах 4–5 см, так как толщина мерзлого слоя не может быть одинакова по всей ячейке (~16 км) продукта LIC SMOS.

Подпочвенный слой по всем участкам был выбран одинаковый по плотности, структуре, и влажности. В течение всего периода наблюдений температурные условия были примерно одинаковыми для всех тестовых участков, а конечная глубина промерзания изменялась от 55 до 190 см. Соленость почвы (почвенного раствора солей) оказывает влияние только на диэлектрические свойства. На температуру замерзания соленость практически не влияет, так как при солености почвенной влаги 40 г/л, температура замерзания понижается только до –2 °С (<http://de-ussr.ru/priroda-ludi/vod-obolochka/zamerzanie.html>).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ ПОЧВЫ

Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что одно и то же значение яркостной температуры может соответствовать разной глубине промерзания почвы в пределах от 20 до 200 см. Это объясняется интерференцией микроволнового излучения, возникающей в результате многократных переот-

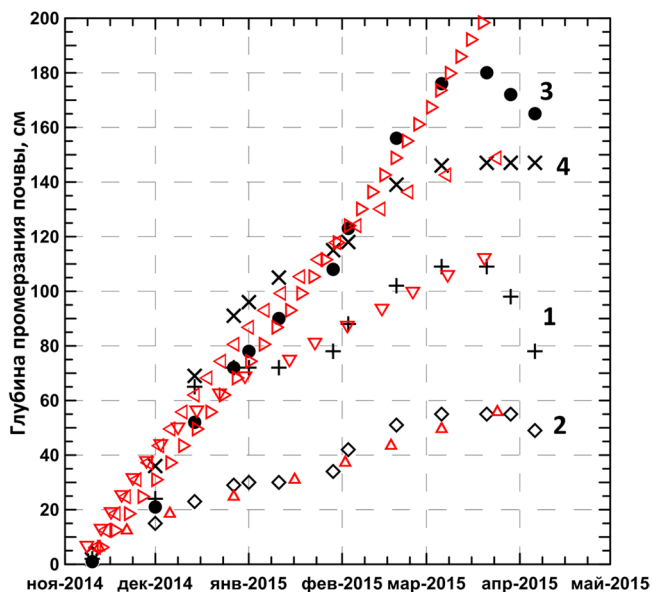


Рис. 6. Значения толщин мерзлого слоя почвы, измеренные и рассчитанные по формуле (4) для четырех исследуемых участков. Номер участка указан рядом с зависимостью, черные значки соответствуют измеренным значениям, красные треугольники — рассчитанным.

ражений радиоволн от границы между мерзлым слоем и незамерзшей почвой. Определение глубины промерзания по однократным измерениям яркостной температуры является проблематичным по многим факторам. Однако, имея интерференционную зависимость яркостной температуры от глубины промерзания можно попытаться восстановить значение глубины промерзания по радио-яркостной температуре. При непрерывном промерзании почвы, два интерференционных пика на интерференционной картине соответствуют двум состояниям промерзшей почвы с толщинами мерзлых слоев $h_{\text{мерз}_i}$ и $h_{\text{мерз}_{i+1}} = h_{\text{мерз}_i} + \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon}}$ см.

При наличии ежедневных спутниковых данных, известных диэлектрических характеристик мерзлой почвы, а также даты начала замерзания, глубина промерзания может быть определена по формуле:

$$h_{\text{мерзл}} = n \cdot L = n \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon}}, \quad (4)$$

где n — порядковый номер максимума сезонной интерференционной зависимости яркостной температуры, ε — диэлектрическая проницаемость мерзлого грунта.

На рис. 6 приведены значения толщин мерзлого слоя почвы, определенные контактным способом на метеостанциях, расположенных вблизи от тестовых участков. На том же рисунке приведены зависимости глубины промерзания, определенные по формуле (4). Отклонения рассчитанных по модели глубин промерзания почвы от экспериментально определенных показаны на рис. 7. Близкое к единице значение коэффициента корреляции говорит о возможности применения описанного выше метода для восстановления значений глубины промерзания почвы по спутниковым данным яркостной температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлены новые закономерности взаимодействия микроволнового излучения почвенного покрова с верхним сезонно-мерзлым слоем. На основе комплексного анализа ежедневных спутниковых данных, результатов полевых измерений и модельных расчетов показана возможность определения глубины промерзания почвы по данным спутниковой

микроволновой радиометрии и известным зависимостям диэлектрических характеристик мерзлых и незамерзших почв от температуры и влажности.

Дистанционное определение глубины промерзания основано на совместном использовании разработанной модели излучения и регулярных (ежедневных) рядов дистанционных измерений яркостных температур, с даты заморозания (определяется по резкому возрастанию T_{Br}) до начала оттаивания (определяется по резкому уменьшению T_{Br}). Непродолжительные по времени периоды зимних оттепелей с появлением жидкой воды на поверхности снежного покрова или почвы могут быть выявлены как кратковременные скачкообразные уменьшения T_{Br} . Для более точного расчета необходимы данные по структуре почвы, исследуемых участков, ее влажности и солёности, а также по градиенту температуры мерзлого слоя.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18–05–00427-а, 18–05–00440-а (Боярский Д.А., Тихонов В.В.); 18–05–00753-а (Хвостов И.В., Романов А.Н.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боярский Д.А., Тихонов В.В.* Модель эффективной диэлектрической проницаемости влажных и мерзлых почв в сверхвысокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 6. С. 914-917.
- Боярский Д.А., Тихонов В.В.* Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв. Препринт ИКИ РАН. Пр-2084, 2003. 48 стр.
- Богородский В.В., Козлов А.И., Тучков Л.Т.* Радиотепловое излучение земных покровов. Л.: Гидрометеиздат. 1977. 224 с.
- Кауричев И.С., Громыко И.Д.* (под ред.). Атлас почв СССР. М.: Колос. 1974. 168 с.
- Клепиков И.Н., Шарков Е.А.* Излучение неоднородных неизотермических сред. Препринт. Пр-801. М.: ИКИ АН СССР. 1983. 31 с.
- Татаринцев В.Л.* Гранулометрия агропочв юга Западной Сибири и их физическое состояние. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет. 2008. 42 с.
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Yu.* Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing. // Progress In Electromagnetics Research. 2002. V. 35. P. 251–269.
- Gutierrez A., Castro R.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model//SO-DS-DME-L1PP-0009. № 2.7. 31 May 2010. URL: <http://www.smos.com.pt/downloads/release/documents/SO-DS-DME-L1PP-0009-DPM-L1c.pdf>

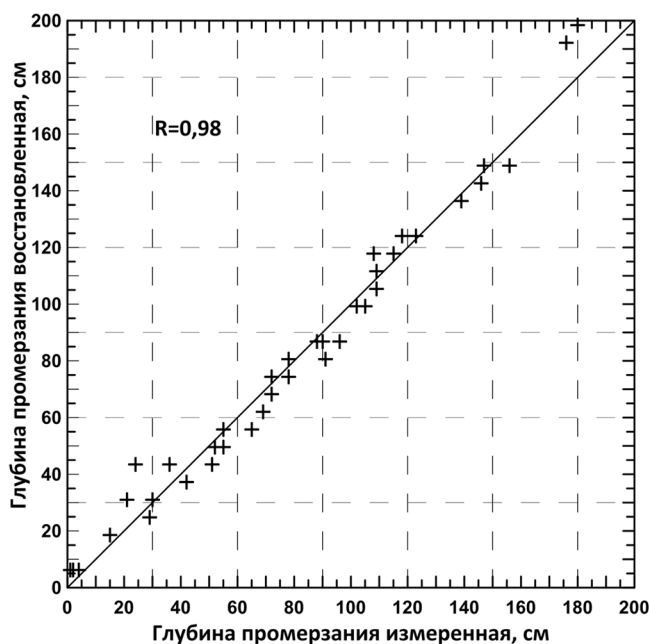


Рис. 7. Диаграмма рассеяния глубины промерзания почвы измеренной и восстановленной по интерференционной модельной зависимости.

- Han L., Tsunekawa A., Tsubo M. Monitoring near-surface soil freeze–thaw cycles in northern China and Mongolia from 1998 to 2007 // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. V. 12. № 5. P. 375–384.
- Jin R., Li X., Che T. A decision tree algorithm for surface soil freeze/thaw classification over China using SSM/I brightness temperature // *Remote Sensing of Environment*. 2009. V. 113. № 12. P. 2651–2660.
- Kalantari P., Bernier M., McDonal K.C., Poulin J. Using SMOS passive microwave data to develop SMAP freeze/thaw algorithms adapted for the Canadian subarctic // *International Conference on Sensors and Models in Remote Sensing and Photogrammetry*. 2015. V. 41. № W5. P. 365–368.
- Leroux D.J., Kerr Y.H., Richaume P., Fieuzal R. Spatial distribution and possible sources of SMOS errors at the global scale // *Remote Sensing of Environment*. 2013. V. 133. P. 240–250.
- Montpetit B., Royer A., Roy A., Langlois A. In-situ passive microwave emission model parameterization of sub-arctic frozen organic soils // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 205. P. 112–118.
- Njoku E.C., Kong J.A. Theore for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture // *Journal of GeophysikalResearch*. 1977. V. 82. № 20. P. 3108–3118.
- Pinori S., Crapolicchio R., Mecklenburg S. Preparing the ESA-SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) mission - Overview of the user data products and data distribution strategy // *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*. 2008. MICRORAD 2008. DOI: 10.1109/MICRAD.2008.4579480.
- Rautiainen K., Lemmetyinen J., Schwank M., Kontu A., Pulliainen J. Detection of soil freezing from L-band passive microwave observations // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 147. P. 206–218.
- Rautiainen K., Parkkinen T., Lemmetyinen J., Schwank M., Wiesmann A., Ikonen J., Derksen C., Davydov S., Davydova A., Boike J., Langer M., Drusc M., Pulliainen J. SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 180. P. 346–360.
- Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid Systems // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. № 2. P. 121–134.
- Sharkov E.A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, Heidelberg, London, New York etc: Springer/PRAXIS. 2003. 613 p.
- Schwank M., Stahli M., Wydler H. et al. Microwave L-band emission of freezing soil. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. № 6. P. 1252–1261.
- Schwank M., Rautiainen K., Matzler C., Stähli M., Wegmuller U. Model for microwave emission of a snow-covered ground with focus on L band // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 154. P. 180–191.
- Shati F., Prakash S., Norouzi H., Blake R. Assessment of differences between near-surface air and soil temperatures for reliable detection of high-latitude freeze and thaw states // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. V. 145. P. 86–92.
- Song L., Zhang X., Li H. Dielectric constants of deep frozen clay soils of Longgu mine (0.1~1GHz) // *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009. V. 1. № 1. P. 519–523.
- Zhang T., Armstrong R.L. Soil freeze/thaw cycles over snow-free land detected by passive microwave remote sensing // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. № 5. P. 763–766.
- Zhang L.X., Zhao K.G., Zhu Y., et al. Simulated radiation characteristics of frozen soil surface at typical microwave bands // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Anchorage. Sep. 20–24, 2004. IGARSS 2004. P. 4310–4313.
- Zhao T., Shi J., Zhang L. 4.13 - Surface Soil Freeze/Thaw State. *Environmental Sciences. Comprehensive Remote Sensing*. 2018. V. 4. P. 315–332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10362-8>

On Evaluation of Depth of Soil Freezing Based on SMOS Satellite Data

D. A. Boyarskii¹, A. N. Romanov², I. V. Khvostov², V. V. Tikhonov^{1,3}, E. A. Sharkov¹

¹*Institute of Space Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia*

The results of a comparative analysis of the brightness temperatures determined from the SMOS satellite and the corresponding depths of soil freezing, measured at weather stations located at the test sites of the Kulunda Plain, are presented. Based on the daily satellite measurement of brightness temperature, the effect of soil freezing on the microwave radiation of the underlying surface was studied. A theoretical calculation of the dependence of soil brightness temperature on the depth of freezing is performed with the model of microwave radiation of a plane-layered inhomogeneous non-isothermal medium. The real parameters of the Kulunda plain soil as well as the climatic characteristics of the sites under study, obtained from the weather stations for the same period, were used as the input parameters of the model. The analysis of satellite, field and model data showed that the evaluation of the depth of soil freezing with satellite microwave radiometry is limited by the need to conduct the contact measurements of physical properties of soil in the areas, for which the SMOS product on the brightness temperature is given.

Keywords: Kulunda plain, seasonally frozen soils, depth of freezing, brightness temperature, microwave range

REFERENCES

- Bogorodsky V.V., Kozlov A.I., Tuchkov L.T.* Radioteplovoe izluchenie zemnykh pokrovov [Radiothermal radiation of the earth covers], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 224 p. (in Russian).
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V.* Effective Permittivity Microwave Model for Wet and Frozen Soils, *Journal of Communications Technology and Electronics*. 1995. V. 40. № 9. P. 51–54. (in Russian).
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V.* Vliyanie svyazannoi vody na dielektricheskuyu pronitsaemost' vlazhnykh i merzlykh pochv [Influence of the Bound Water on Dielectric Permeability Wet and Frozen Soil], Moscow: Preprint SRI RAS, Pr-2084. 2003. 48 p. (in Russian).
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Yu.* Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing // *Progress In Electromagnetics Research*. 2002. V. 35. P. 251–269.
- Gutierrez A., Castro R.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model//SO-DS-DME-L1PP-0009. № 2.7. 31 May 2010. URL: <http://www.smos.com.pt/downloads/release/documents/SO-DS-DME-L1PP-0009-DPM-L1c.pdf>.
- Han L., Tsunekawa A., Tsubo M.* Monitoring near-surface soil freeze–thaw cycles in northern China and Mongolia from 1998 to 2007 // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. V. 12. № 5. P. 375–384.
- Jin R., Li X., Che T.* A decision tree algorithm for surface soil freeze/thaw classification over China using SSM/I brightness temperature // *Remote Sensing of Environment*. 2009. V. 113. № 12. P. 2651–2660.
- Kalantari P., Bernier M., McDonal K.C., Poulin J.* Using SMOS passive microwave data to develop SMAP freeze/thaw algorithms adapted for the Canadian subarctic // *International Conference on Sensors and Models in Remote Sensing and Photogrammetry*. 2015. V. 41. № W5. P. 365–368.
- Kaurichev I.S., Gromyko I.D.* (eds). Atlas pochv SSSR [Atlas of soils of the USSR], Moscow: Kolos, 1974. 168 p. (in Russian).
- Klepikov I.N., Sharkov E.A.* Izluchenie neodnorodnykh neizotermicheskikh sred [Radiation of inhomogeneous non-isothermal media], Preprint SRI USSR Academy of Sciences, 1983. 31 p. (in Russian).
- Leroux D.J., Kerr Y.H., Richaume P., Fieuzal R.* Spatial distribution and possible sources of SMOS errors at the global scale // *Remote Sensing of Environment*. 2013. V. 133. P. 240–250.
- Montpetit B., Royer A., Roy A., Langlois A.* In-situ passive microwave emission model parameterization of sub-arctic frozen organic soils // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 205. P. 112–118.
- Njoku E.C., Kong J.A.* Theore for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture // *Journal of GeophysikalReseach*. 1977. V. 82. № 20. P. 3108–3118.
- Pinori S., Crapolicchio R., Mecklenburg S.* Preparing the ESA-SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) mission – Overview of the user data products and data distribution strategy // *Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*. 2008. MICRORAD 2008. DOI: 10.1109/MICRAD.2008.4579480.
- Rautiainen K., Lemmetyinen J., Schwank M., Kontu A., Pulliainen J.* Detection of soil freezing from L-band passive microwave observations // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 147. P. 206–218.
- Rautiainen K., Parkkinen T., Lemmetyinen J., Schwank M., Wiesmann A., Ikonen J., Derksen C., Davydov S., Davydova A., Boike J., Langer M., Drusc M., Pulliainen J.* SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 180. P. 346–360.
- Sahr K., White D., Kimerling A.J.* Geodesic Discrete Global Grid Systems // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. № 2. P. 121–134.
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, Heidelberg, London, New York etc: Springer/PRAXIS. 2003. 613 p.
- Schwank M., Stahli M., Wydler H. et al.* Microwave L-band emission of freezing soil // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. N. 6. P. 1252–1261.
- Schwank M., Rautiainen K., Matzler C., Stähli M., Wegmuller U.* Model for microwave emission of a snow-covered ground with focus on L band // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 154. P. 180–191.
- Shati F., Prakash S., Norouzi H., Blake R.* Assessment of differences between near-surface air and soil temperatures for reliable detection of high-latitude freeze and thaw states // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. V. 145. P. 86–92.
- Song L., Zhang X., Li H.* Dielectric constants of deep frozen clay soils of Longgu mine (0.1–1GHz) // *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009. V. 1. № 1. P. 519–523.
- Tatarintsev V. L.* Granulometriya agropochv yuga Zapadnoi Sibiri i ikh fizicheskoe sostoyanie: Avtoreferat Diss. dok. sel'skokhozyaistvennykh nauk [Granulometry of agricultural soils of the South of Western Siberia and their physical condition. Doc. agricultural sci. thesis], Barnaul: Altai state agrarian University, 2008. 42 p. (in Russian).
- Zhang T., Armstrong R.L.* Soil freeze/thaw cycles over snow-free land detected by passive microwave remote sensing // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. № 5. P. 763–766.
- Zhang L.X., Zhao K.G., Zhu Y., et al.* Simulated radiation characteristics of frozen soil surface at typical microwave bands // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Anchorage. Sep. 20–24, 2004. IGARSS 2004. P. 4310–4313.
- Zhao T., Shi J., Zhang L.* 4.13 - Surface Soil Freeze/Thaw State. *Environmental Sciences. Comprehensive Remote Sensing*. 2018. V. 4. P. 315–332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10362-8>.