

Прогнозирование лавинной опасности методами микроволновой радиометрии

Д. А. Боярский¹, В. В. Дмитриев², В. В. Тихонов¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: dboyarski@rambler.ru

² *Омский государственный педагогический университет, Омск, 644099, Россия*

В работе представлены и проанализированы результаты наземного эксперимента по определению угловых зависимостей радиояркостной температуры снежного покрова, лежащего на поверхности земли, в микроволновом диапазоне. Исследования проводились с 9 января по 9 апреля 1989 г. в диапазоне углов 50–85° с интервалом 5° на радиометрическом полигоне в районе Крестового перевала Военно-Грузинской дороги на высоте 2297 м над уровнем моря. Угловой спектр радиояркостной температуры на частоте 3,75 ГГц сопоставлен с метеорологическими данными и изменениями стратиграфии снежного покрова в течение сезона. Проведённые исследования позволили установить прямую зависимость формы углового спектра радиояркостной температуры на частоте 3,75 ГГц и вертикальной поляризации принимаемого сигнала от появления глубинной изморози в толще снежного покрова. Слой глубинной изморози при развитии снежных форм образует так называемый ослабленный горизонт, по которому возможен сход лавин, так как ледяная решётка снега становится более хрупкой и менее пластичной и вероятность разрывных деформаций при нагрузках резко возрастает. При разрыве связей и разрушении кристаллов льда нарушается связь между горизонтами снега, что приводит к сходу лавин. В настоящей работе рассмотрена возможность создания методики дистанционного радиометрического контроля состояния глубинных слоёв снежного покрова в микроволновом диапазоне для оценки локальной лавинной опасности.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, стратиграфия снежного покрова, яркостная температура, лавинная опасность, угол Брюстера

Одобрена к печати: 22.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-269-278

Введение

Снежные лавины — одно из наиболее существенных природных явлений, представляющее серьёзную опасность в заснеженных горных районах по всему миру и часто угрожающее жизни людей и созданной инфраструктуре. Наличие лавинной опасности определяет необходимость исследования причин и закономерностей нарушения устойчивости снежного покрова на горных склонах. Работы в данном направлении могут способствовать снижению материального ущерба и предотвращению несчастных случаев. Поскольку эти исследования находятся на стыке многих научных дисциплин, в них широко применяются различные методы. Это гляциологические методы исследования характеристик снега, методы математического моделирования лавинного процесса, построение эмпирико-статистических зависимостей влияния климатических факторов на сход лавин, а также спутниковое многочастотное зондирование и другие методы дистанционного мониторинга.

Дистанционные методы позволяют проводить объективные, безопасные и непрерывные наблюдения снежных лавин в различных пространственных масштабах (Eckerstorfer et al., 2016; Tsai et al., 2019). При дистанционном зондировании используются мощные инструменты для контроля изменений различных физических свойств наблюдаемых природных объектов (например, динамика поверхности, изменение её текстуры и содержания в ней влаги и т. д.). Вместе с математическими моделями исследуемых явлений методы дистанционного зондирования особенно перспективны для решения задач мониторинга опасных природных явлений, в том числе при подготовке прогнозов лавинной опасности (Eckerstorfer et al., 2019; Rosendahl, Weibgraeber, 2020a, b). Для исследования снежного покрова успешно применяется

микроволновое дистанционное зондирование. Наиболее информативными для решения задачи дистанционного зондирования снежного покрова стали диапазоны сантиметровых и миллиметровых волн, так как длина волны излучения оказывается сравнимой либо с размером частиц, либо с неоднородностями их концентрации (Голунов, 2019; Голунов и др., 2017; Tedesco, 2015).

Данная работа посвящена описанию и анализу результатов наземного эксперимента по определению частотных и угловых зависимостей радиояркостной температуры снежного покрова в микроволновом диапазоне. Проведённые исследования позволили установить прямую зависимость формы углового спектра радиояркостной температуры (T_d) на частоте 3,75 ГГц и вертикальной поляризации принимаемого сигнала от появления глубинной изморози в толще снежного покрова. При анализе результатов измерений во всех диапазонах выяснилось, что наиболее информативным для решения поставленной задачи, а именно обнаружения слоя глубинной изморози, оказался диапазон 8 см, поэтому в настоящей работе будут рассмотрены данные только в этом диапазоне. Первое упоминание об этом явлении содержится в работе (Дмитриев, 1990), в которой отмечается понижение радиояркостной температуры снежного покрова на частоте 3,75 ГГц примерно с середины снежного сезона. Автор высказывает предположение, что на распространение электромагнитного излучения длинноволновой части сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона оказало влияние изменение структуры приземного слоя снежного покрова, а именно образование слоя глубинной изморози, состоящей из вертикальных сростков ледяных кристаллов. Слой глубинной изморози при развитии снежных форм образует так называемый ослабленный горизонт, по которому возможен сход лавин, так как ледяная решётка снега становится более хрупкой и менее пластичной и вероятность разрывных деформаций при нагрузках резко возрастает (Коломыц, 1976). При разрыве связей и разрушении кристаллов льда нарушается связь между горизонтами снега, что приводит к сходу лавин. В настоящей работе рассмотрена возможность создания методики дистанционного радиометрического контроля состояния глубинных слоёв снежного покрова в микроволновом диапазоне для оценки локальной лавинной опасности.

Объект исследования

Объектом исследований лавиноведения стал природный лавинный комплекс, который состоит из лавиносбора, снежного покрова в лавиносборе, из которого формируются лавины, и самой лавины (Божинский, Лосев, 1987).

Формирование снежного покрова определяется как климатическими особенностями региона, так и текущими погодными условиями. В работе (Олейников, Володичева, 2019) отмечено, что температурный фон зимы во многом определяет интенсивность процессов перекристаллизации снега и общее направление в развитии снежной толщ — по типу разрыхления или уплотнения. В высокогорной зоне Центрального Кавказа в тёплые зимы преобладающее развитие в снежном покрове получают процессы уплотнения, которые ведут к стабилизации снега на склоне и общему ослаблению лавинной активности. В холодные зимы, напротив, доминируют процессы разрыхления, которые усиливают структурно-стратиграфические неоднородности снежной толщ, способствуют образованию лавиноопасных слоёв из слабосвязного снега, что в итоге снижает устойчивость снежной массы на склоне.

В представленной работе исследована часть природного лавинного комплекса — снежный покров. Натурный эксперимент по определению связи между электродинамическими и физическими параметрами естественного снежного покрова проводился на высокогорном полигоне на высоте 2297 м н. у. м. (над уровнем моря). В наших исследованиях мы не имели возможности проводить дистанционные радиометрические и контактные гляциологические измерения непосредственно в лавиносборах, поскольку осуществлять наблюдения за снежным покровом в этой зоне опасно. В целях безопасности исследований тестовая площадка выбиралась таким образом, чтобы она была по возможности плоской или же с плавными изменениями рельефа.

Методы исследования. Наземный эксперимент

Нами был проведён комплексный наземный эксперимент, в ходе которого одновременно определялись физические и радиофизические характеристики снежного покрова.

Экспериментальные исследования излучательной способности снежного покрова, лежащего на поверхности земли, проводились на радиометрическом полигоне в течение двух зим 1987/1988 и 1988/1989 гг. Радиометрический полигон находился в районе Крестового перевала Военно-Грузинской дороги на высоте 2297 м н. у. м. При выборе тестовой площадки было соблюдено условие свободного горизонта, т. е. горизонт не перекрывался противоположащими склонами, что позволило корректно провести измерения угловых зависимостей излучения снега при настильных углах зондирования.

Измерительная площадка выбиралась таким образом, чтобы на ней отсутствовали камни и крупная растительность. Кроме того, площадка располагалась так, чтобы она была по возможности плоской или же с плавными изменениями рельефа. На измерительной площадке были установлены комплекс радиометрической аппаратуры и калибровочные тела.

Исследование излучательных характеристик снежной среды проводилось с помощью многочастотного микроволнового измерительного комплекса (Эткин и др., 1987). Используемый аппаратный комплекс позволял проводить измерения радиояркостной температуры снежного покрова в четырёх диапазонах длин волн. Радиометры размещались в герметичных корпусах, осуществляющих влаго- и теплоизоляцию СВЧ-элементов от внешней среды, и имели автоматическую систему термостатирования. Радиометрические приёмники обладали различными схемами построения, отличались по типу и реализуемой чувствительности. Основные характеристики радиометрической аппаратуры приведены в *табл. 1*. Комплекс радиометров размещался на высоте 5 м над землёй на поворотном устройстве, позволяющем в ходе эксперимента изменять угол места и азимутальный угол. Для проведения калибровки радиометров в качестве эталонных источников излучения использовались: зенит, металлический лист и чёрное тело. Металлический лист и чёрное тело располагались в дальней зоне антенн, и их угловой размер был больше угловых размеров главных лепестков диаграмм направленности антенн. Наведение радиометров на цель осуществлялось при помощи теодолита и гелий-неонового лазера, используемого в качестве прицела, которые также крепились на поворотном устройстве.

Таблица 1. Характеристики радиометрической аппаратуры

	Частота, ГГц			
	3,75	19,5	37,5	150
Ширина полосы пропускания, ГГц	0,2	0,7	0,5; 0,7	1,0
Чувствительность, К при $\tau = 1$ с	0,1	0,15; 0,2	0,1; 0,2	0,6
$\Theta_{3\text{ дБ}}$, град	15	9	9	8
Поляризация	В	В; Г	В; Г	В

Примечание: В — вертикальная поляризация; Г — горизонтальная поляризация.

Измерения собственного излучения сухого снежного покрова проводились в вечерние часы, после захода солнца. В этом случае влажность снега становится пренебрежимо малой. Исследование излучательных характеристик влажного снежного покрова проводилось в дневные часы, когда под действием солнечной радиации появлялась жидкая вода в верхних слоях снежного покрова. С момента начала снеготаяния, когда температура всей снежной толщи приблизилась к 0 °С, измерения выполнялись как в дневные, так и вечерние часы.

Программа измерений включала ежедневное определение радиояркостной температуры снежного покрова под различными углами визирования. Снегомерные наблюдения велись в контрольных шурфах в непосредственной близости к радиометрической площадке.

Гляциологические контактные измерения параметров снега в шурфе проводились одновременно с радиометрическими измерениями и включали исследование стратиграфии снежного покрова. Образцы снега отбирались из однородных слоёв естественного снежного покрова, и проводилось послойное определение плотности, температуры и влажности. Для всех образцов исследовались параметры структуры снега: средний диаметр зёрен, дисперсия распределения зёрен по размерам.

Обсуждение результатов

В настоящей работе мы рассмотрим результаты измерений угловых зависимостей радиояростной температуры снежного покрова на частоте 3,75 ГГц и вертикальной поляризации принимаемого сигнала. Наблюдения проводились с 9 января по 9 апреля 1989 г. в диапазоне углов 50–85° с интервалом 5°.

Данные метеонаблюдений: среднесуточная температура воздуха, температура поверхности почвы, количество осадков для радиометрического полигона приведены на *рис. 1*. Отметим, что почва под снегом начинала промерзать только в первой декаде января, не смотря на то что температура воздуха являлась отрицательной и колебалась в районе -10°C . Температура поверхности почвы понижалась до середины февраля и имела минимальное значение $-3,5^{\circ}\text{C}$ 16 февраля. За несколько дней до того как температура поверхности почвы достигла минимального за зиму показателя, среднесуточная температура воздуха также имела минимальные значения -17°C (12 и 13 февраля), а минимальная температура воздуха в эти дни опускалась до -21°C .

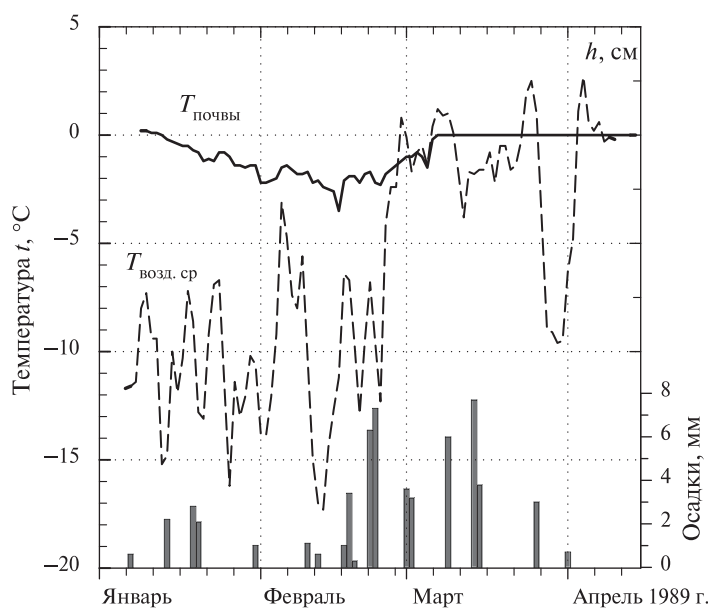


Рис. 1. Среднесуточная температура воздуха, температура поверхности почвы и количество осадков (мм вод. ст.) для исследуемого участка

Изменение высоты и структуры снежного покрова за время проведения наблюдений приведено на *рис. 2* (см. с. 273). Представленные результаты сезонного наблюдения за изменением стратиграфии хорошо показывают различные стадии метаморфизма снега. Метаморфизм начинается с разрушения снежинок, после чего в результате округления и собирательной перекристаллизации снег превращается в мелкозернистую среду, состоящую из неправильной формы зёрен примерно одинакового размера. В дальнейшем количество зёрен в единице объёма снега уменьшается, а средний их диаметр увеличивается. Это приводит к постепенному превращению мелкозернистого снега в среднезернистый, а затем — в круп-

нозернистый (Войтковский, 1989). В марте в нижних горизонтах снежного покрова образовался слой глубинной изморози, состоящий из крупных ледяных кристаллов, относительно слабо связанных друг с другом.

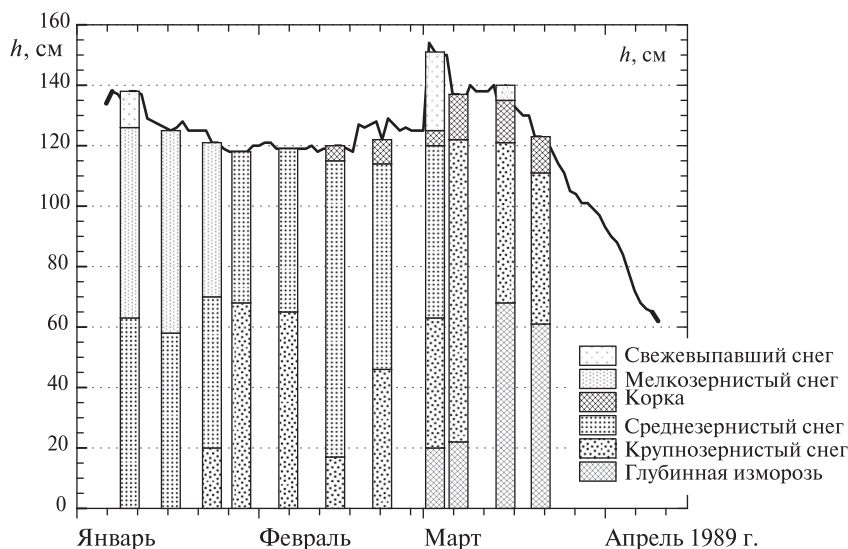


Рис. 2. Изменение высоты снежного покрова и стратиграфические разрезы снежной толщи. Измерения в шурфе выполнены: 10, 17, 24, 29 января, 6, 14, 22 февраля, 3, 7, 15, 21 марта 1989 г.

Глубинная изморозь представляет собой кристаллы, образующиеся в завершающей стадии конструктивного метаморфизма (Божинский, Лосев, 1987). Глубинная изморозь может встречаться во всех регионах земли, где формируется снежный покров, который существует достаточно долго — до достижения этапа конструктивного метаморфизма. В целом при увеличении континентальности климата глубинная изморозь развивается быстрее и её горизонты в снежной толще более мощные. Размеры кристаллов глубинной изморози варьируют от 0,8 до 6–7 мм. Например, в Подмосковье к концу зимы кристаллы в глубинной изморози достигают 3–5 мм в поперечнике и слагают нижний слой снежной толщи, над которым лежит слой мелкой глубинной изморози со средним размером кристаллов 1,5–2 мм (Чернов, 2013). По мере перекристаллизации снежной толщи в ней развивается вертикальная предпочтительная ориентировка главных осей кристаллов. Вертикальные сростки ледяных частиц придают снежному разрезу характерную «волокнистую» текстуру (Божинский, Лосев, 1987; Международная..., 2012).

Таблица 2. Стратиграфия снежного покрова 24 января и 21 марта. Слои, структура, параметры каждого слоя: температура (t), плотность (ρ), средний диаметр зёрен (d_{cp}), дисперсия размеров зёрен (σ), объёмная влажность (W)

Дата	Расстояние от поверхности почвы, см	Структура	t , °C	ρ , кг/м ³	d_{cp} , мм	σ , %	W , %
24.01.1989	70–121	МЗС	–7,6	330	0,44	34,27	0
	20–70	СЗС	–3,6	436	0,63	32,50	
	0–20	СЗС	–0,8	500	0,79	30,18	
21.03.1989	111–123	КР	0	364	2,67	28,06	3,9
	61–111	КЗС		430	1,06	29,11	6,6
	0–61	ГИ		0,89	32,76	2,8	

В табл. 2 представлены снежные профили на 24.01.1989 и 21.03.1989. Структура снега дана сокращениями: мелкозернистый — МЗС, среднезернистый — СЗС, крупнозернистый —

КЗС, глубинная изморозь — ГИ, режеляционная корка — КР. Известно (Международная..., 2012), что режеляционная перекристаллизация снега происходит с переходом через жидкую фазу, возникающую, в частности, за счёт притока тепла извне (например, притока солнечной радиации). Талая вода, перемещаясь внутри снега, замерзает и цементирует его. При этом режеляционное округление и смерзание зёрен снега затрагивают лишь верхний его слой толщиной около 5–15 см (Чернов, 2013).

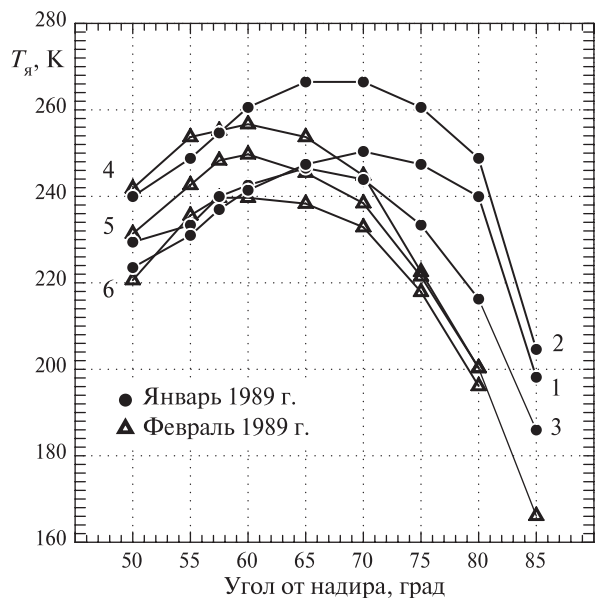


Рис. 3. Угловые зависимости радиояркостной температуры снежного покрова на частоте 3,75 ГГц, вертикальная поляризация, полученные в январе и феврале. Даты измерений 1989 г.: 1 — 10 января; 2 — 12 января; 3 — 20 января; 4 — 6 февраля; 5 — 16 февраля; 6 — 24 февраля

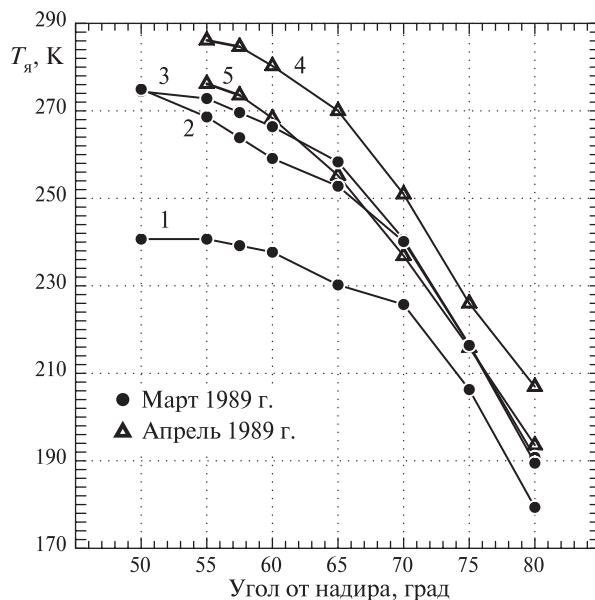


Рис. 4. Угловые зависимости радиояркостной температуры снежного покрова, полученные в марте и апреле, на частоте 3,75 ГГц, вертикальная поляризация. Даты измерений 1989 г.: 1 — 3 марта; 2 — 16 марта; 3 — 22 марта; 4 — 2 апреля; 5 — 9 апреля

Зависимости радиояркостной температуры от угла наблюдения приведены на рис. 3 и 4. Как видно на рисунках, в январе и феврале угловые зависимости имеют вид, соответствующий френелевским коэффициентам отражения, когда угол Брюстера ярко выражен (см. рис. 3), его величина различна для разных дней проведения измерений и зависит от температуры почвы под снегом. Известно (Ulaby et al., 1985), что на частотах ниже 10 ГГц параметры сухого снежного покрова не оказывают значительного влияния на его радиояркостную температуру, поскольку как поглощение, так и рассеяние в снегу на этих частотах незначительно. Экспериментально определённые значения угла Брюстера в зависимости от физической температуры поверхности почвы показаны на рис. 5 одновременно с аппроксимирующей кривой, которая имеет вид:

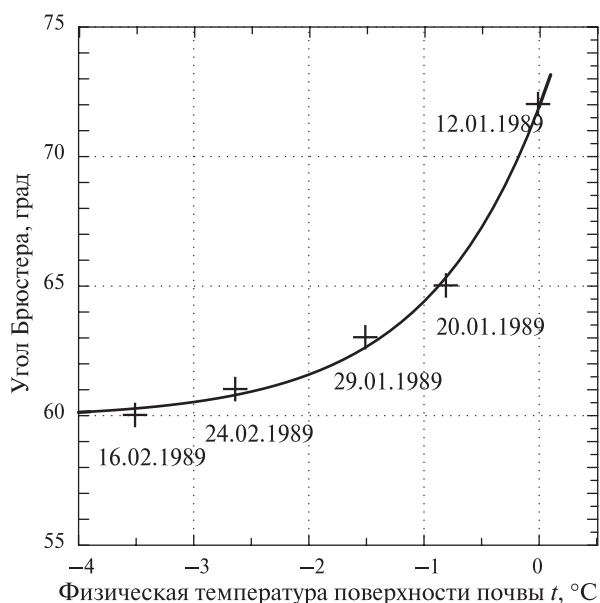


Рис. 5. Зависимость угла Брюстера от температуры почвы в наземном эксперименте (кресты) и аппроксимирующая зависимость

$$f(t) = a + b \cdot \exp(ct),$$

где t — физическая температура поверхности почвы (в °С); $a = 59,89$; $b = 12,03$; $c = 0,98$. Даты проведения измерений указаны на *рис. 5*.

Известно, что величина угла Брюстера определяется диэлектрической проницаемостью вещества (см., например, работу (Шарков, 2014)). Диэлектрическая проницаемость почвы при отрицательных температурах имеет температурную зависимость (Боярский, Тихонов, 2003; Боярский и др., 2019; Boyarskii et al., 2002; Hallikainen et al., 1985), поскольку не вся вода в почве замерзает даже при температурах $-40...-50$ °С. Таким образом, снижение физической температуры почвы приводит к уменьшению количества жидкой влаги, содержащейся в ней при отрицательной температуре, и, следовательно, уменьшению её диэлектрической проницаемости и угла Брюстера.

Из сравнения угловых зависимостей $T_{\text{я}}$ на *рис. 3* и *4* видно, что если в январе–феврале угловые зависимости имеют френелевский вид, то в течение снежного сезона угол Брюстера становится менее выраженным (кривая 1 на *рис. 4*), а в марте–апреле угловая зависимость радиояркой температуры имеет сглаженный характер (кривые 2–5 на *рис. 4*). Зафиксированное в эксперименте изменение угловой зависимости излучения снега не может быть объяснено изменением состояния почвы. Как следует из данных метеонаблюдений (см. *рис. 1*), температурный и влажностный режим почвы до середины января и начиная со второй недели марта одинаковы. Однако при этом угловые зависимости $T_{\text{я}}$ от 10 и 12 января демонстрируют наличие угла Брюстера, в то время как аналогичные зависимости за март и апрель имеют, как уже отмечалось, сглаженный вид.

На наш взгляд, как показывает сопоставление зависимостей $T_{\text{я}}$ и сезонного развития снежного покрова, сглаживание зависимости радиояркой температуры от угла визирования (кривая 1 на *рис. 4*) совпадает с появлением слоя глубинной изморози (снежный профиль 3 марта, см. *рис. 2*). Дальнейший рост слоя глубинной изморози (снежные профили 7, 15, 21 марта, см. *рис. 2*) приводит к практически гладкой угловой зависимости $T_{\text{я}}$ (кривые 2–5 на *рис. 4*). Появление влаги в снежном покрове в марте (см. *табл. 2*) не оказывает значительного влияния на $T_{\text{я}}$ на частоте 3,75 ГГц и не влияет на угловые зависимости (Boyarskii, Tikhonov, 2000).

Принимаемое радиометром излучение состоит из трёх компонент: излучение земли, прошедшее сквозь снежный покров, отражённое излучение неба и собственное излучение снежного покрова. Излучение слоя снега и излучение подстилающей поверхности подвергаются влиянию границ раздела «воздух—снег» и «снег—земля», а также поглощению и рассеянию снежной толщей. Микроволновое излучение, проходящее сквозь снежную толщу, поглощается и рассеивается ледяными кристаллами. Преобладание эффектов рассеяния или поглощения электромагнитного излучения в снежном покрове определяется длиной волны излучения и размерами ледяных кристаллов, образующих снежный покров (Boyarskii, Tikhonov, 2000). При отсутствии слоя глубинной изморози излучение на частоте 3,75 ГГц определяется только излучением земли, так как снег является практически прозрачным в этом диапазоне. При появлении слоя глубинной изморози происходит рассеяние излучения на вертикальных сростках ледяных кристаллов. Это приводит к изменению угловой зависимости радиояркой температуры.

Заключение

Рассмотрены результаты измерений угловых зависимостей радиояркой температуры снежного покрова, лежащего на поверхности земли, на радиометрическом полигоне в районе Крестового перевала Военно-Грузинской дороги на высоте 2297 м н.у.м. Наблюдения проводились с 9 января по 9 апреля 1989 г. в диапазоне углов $50-85^\circ$ с интервалом 5° . Угловой спектр радиояркой температуры на частоте 3,75 ГГц сопоставлен с метеорологическими данными и изменениями стратиграфии снежного покрова в течение сезона. Проведённые исследования позволили установить прямую зависимость формы углового

спектра радиояркой температуры ($T_{я}$) на частоте 3,75 ГГц и вертикальной поляризации принимаемого сигнала от появления глубинной изморози в толще снежного покрова.

Отмечено, что возникающая на стадии конструктивного метаморфизма структура приземного слоя снежного покрова оказывает существенное влияние на распространение электромагнитного излучения длинноволновой части СВЧ-диапазона. Появление слоя глубинной изморози, состоящего из вертикальных сростков ледяных кристаллов, приводит к сглаживанию зависимости радиояркой температуры от угла визирования. На основе обнаруженного влияния глубинной изморози на угловые зависимости радиояркой температуры на частоте 3,75 ГГц и вертикальной поляризации принимаемого сигнала возможно создание методики дистанционного локального контроля состояния глубинных слоёв снежного покрова для прогнозирования лавинной опасности в горах.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 18–05–00427-а, 18–05–00440-а, а также темы «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164.

Литература

1. Божинский А. Н., Лосев К. С. Основы лавиноведения. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 280 с.
2. Боярский Д. А., Тихонов В. В. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв: препринт. Пр-2084. М.: ИКИ РАН, 2003. 48 с.
3. Боярский Д. А., Романов А. Н., Хвостов И. В., Тихонов В. В., Шарков Е. А. Оценка глубины промерзания почвенного покрова по данным спутника SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 2. С. 3213. URL: <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-13>.
4. Войтковский К. Ф. Лавиноведение: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1989. 158 с.
5. Голунов В. А. Рассеяние теплового микроволнового излучения на неоднородностях плотности свежевыпавшего и мелкозернистого снега // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 10. С. 953–961.
6. Голунов В. А., Кузьмин А. В., Скулачев Д. П., Хохлов Г. И. Результаты экспериментального исследования частотной зависимости ослабления, рассеяния и поглощения миллиметровых волн в сухом снежном покрове // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 9. С. 857–865.
7. Дмитриев В. В. Влияние структуры снежного покрова на его излучательные характеристики в СВЧ-диапазоне: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1990. 240 с.
8. Коломыц Э. Г. Структура снега и ландшафтная индикация. М.: Наука, 1976. 230 с.
9. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега. Материалы гляциологических исследований. Вып. 2012-2. М.: Ин-т географии РАН, 2012. 80 с.
10. Олейников А. Д., Володичева Н. А. Современные тенденции изменения снеголавинного режима Центрального Кавказа (на примере Приэльбрусья) // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 191–200.
11. Чернов Р. А. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности глубинной изморози // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 3. С. 71–77.
12. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
13. Эткин В. С., Алексин Б. Е., Анискович В. М., Беляков Г. И., Болотникова Г. А., Ворсин Н. Н., Дикович С. В., Забышный А. И., Комаров Н. Л., Кузьмин А. В., Литовченко К. Ц., Малеев С. М., Милицкий Ю. А., Мировский В. Г., Никитин В. В., Николаев Е. С., Раев М. Д., Поспелов М. Н., Смирнов А. И., Степанов К. Г., Трохимовский Ю. Г., Хрупин А. С., Шаранов А. Н. Многоканальный самолетный комплекс для радиогидрофизических исследований: препринт. Пр-1279. М.: ИКИ РАН, 1987. 43 с.
14. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V. The Influence of Stratigraphy on Microwave Radiation from Natural Snow Cover // J. Electromagnetic Waves and Applications. 2000. V. 14. No. 9. P. 1265–1285.
15. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu. Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing // J. Electromagnetic Waves and Applications. 2002. V. 16. No. 3. P. 411–412.
16. Eckerstorfer M., Bühler Y., Frauenfelder R., Malnes E. Remote sensing of snow avalanches: Recent advances, potential, and limitations // Cold Regions Science and Technology. 2016. V. 121. P. 126–140.
17. Eckerstorfer M., Vickers H., Malnes E., Grahn J. Near-Real Time Automatic Snow Avalanche Activity Monitoring System Using Sentinel-1 SAR Data in Norway // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 23. Art. 2863.

18. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. S., El-Rayes M. A., Wu L.-K. Microwave dielectric behaviour of wet snow and soil // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1985. V. GE-23. No. 6. P. 25–46.
19. Rosendahl P. L., Weibgraeber P. (2020a) Modeling snow slab avalanches caused by weak-layer failure. Pt. 1: Slabs on compliant and collapsible weak layers // The Cryosphere. 2020. V. 14. No. 1. P. 115–130.
20. Rosendahl P. L., Weibgraeber P. (2020b) Modeling snow slab avalanches caused by weak-layer failure. Pt. 2: Coupled mixed-mode criterion for skier-triggered anticracks // The Cryosphere. 2020. V. 14. No. 1. P. 131–145.
21. Tedesco M. Remote sensing of the cryosphere. Oxford: JohnWiley and Sons, 2015. 404 p.
22. Tsai Y.-L. S., Dietz A., Oppelt N., Kuenzer C. A Combination of PROBA-V/MODIS-Based Products with Sentinel-1 SAR Data for Detecting Wet and Dry Snow Cover in Mountainous Areas // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 16. Art. 1903.
23. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Dedham, MA: Artech House, 1985. 456 p.

Avalanche hazard prediction using microwave radiometry methods

D. A. Boyarskii¹, V. V. Dmitriev², V. V. Tikhonov¹

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: dboyarski@rambler.ru

² Omsk State Pedagogical University, Omsk 644099, Russia

The paper presents and analyzes the results of a ground-based experiment to determine the angular dependences of brightness temperature of the snow cover on the Earth surface in the microwave range. The investigations were carried out from January 9 to April 9, 1989, in the range of angles 50–85° with an interval of 5° at a radiometric test site in the area of the Cross Pass of the Georgian Military Highway at an altitude of 2297 m above sea level. The angular spectrum of the brightness temperature at a frequency of 3.75 GHz is compared with meteorological data and changes in snow cover stratigraphy during the season. Direct dependence was established of the shape of the angular spectrum of the brightness temperature at a frequency of 3.75 GHz and vertical polarization of the received signal on the appearance of deep rime in the depth of the snow column. A layer of deep rime can form the so-called weakened horizon, along which avalanches are possible, since the ice lattice of snow becomes more fragile and less plastic, and the probability of ruptured deformations under load increases sharply. When the bonds break and the ice crystals are destroyed, the connection between the snow horizons breaks, which leads to avalanches. In this work, we consider the possibility of creating a method for remote radiometric monitoring of the state of deep layers of snow cover in the microwave range to assess local avalanche hazard.

Keywords: microwave radiometry, snow cover stratigraphy, brightness temperature, avalanche hazard, Brewster angle

Accepted: 22.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-269-278

References

1. Bozhinsky A. N., Losev K. S., *Osnovy lavinovedeniya* (Fundamentals of avalanche science), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 280 p.
2. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., *Vliyanie svyazannoi vody na dielektricheskuyu pronitsaemost' vlazhnykh i merzlykh pochv: preprint. Pr-2084* (Influence of the Bound Water on Dielectric Permeability Wet and Frozen Soil: preprint. Pr-2084), Moscow: IKI RAN, 2003, 48 p.
3. Boyarskii D. A., Romanov A. N., Khvostov I. V., Tikhonov V. V., Sharkov E. A., On Evaluation of Depth of Soil Freezing Based on SMOS Satellite Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 996–1004, DOI: 10.1134/S0001433819090147.
4. Voitkovsky K. F., *Lavinovedenie* (Avalanche studies), Moscow: Izd. MGU, 1989, 158 p.

5. Golunov V. A., Rasseyanie teplovogo mikrovolnovogo izlucheniya na neodnorodnostyakh plotnosti svezhevyvavshogo i melkozernistogo snega (Scattering of thermal microwave radiation by density inhomogeneities of fresh and fine-grained snow), *Radiotekhnika i elektronika*, 2019, Vol. 64, No. 10, pp. 953–961.
6. Golunov V. A., Kuzmin A. V., Skulachev D. P., Khokhlov G. I., Rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniya chastotnoi zavisimosti oslableniya, rasseyaniya i pogloshcheniya millimetrovykh voln v sukhom snezhnom pokrove (Experimental results of the frequency dependence of attenuation, scattering and absorption of millimeter waves in dry snow cover), *Radiotekhnika i elektronika*, 2017, Vol. 62, No. 9, pp. 857–865.
7. Dmitriev V. V., *Vliyaniye struktury snezhnogo pokrova na ego izluchatel'nye kharakteristiki v SVCh-diapazone: diss. kand. fiz.-mat. nauk* (Influence of the structure of the snow cover on its radiation characteristics in the microwave range, Cand. phys. math. sci. thesis), Moscow, 1990, 240 p.
8. Kolomyts E. G., *Struktura snega i landshaftnaya indikatsiya* (Snow structure and landscape display), Moscow: Nauka, 1976, 230 p.
9. *Mezhdunarodnaya klassifikatsiya dlya sezonno-vypadayushchego snega. Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy. Vypusk 2012-2* (The International Classification for Seasonal Snow on the Ground: IHP-VII Technical Documents in Hydrology), Moscow: Institut geografii RAN, 2012, 80 p.
10. Oleinikov A. D., Volodicheva N. A., Sovremennyye tendentsii izmeneniya snegolavinnogo rezhima Tsentral'nogo Kavkaza (na primere Priel'brus'ya) (Recent trends of snow avalanche regime in the Central Caucasus (Elbrus region as an example)), *Led i Sneg*, 2019, Vol. 59, No. 2, pp. 191–200.
11. Chernov R. A., Eksperimental'noe opredeleniye effektivnoy teploprovodnosti glubinnoi izmorozhi (Experimental determination of the effective thermal conductivity of deep rime), *Led i Sneg*, 2013, Vol. 53, No. 3, pp. 71–77.
12. Sharkov E. A., *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovaniye Zemli: fizicheskie osnovy, T. 1* (Radiothermal remote sensing of the Earth: physical foundations, Vol. 1), Moscow: IKI RAN, 2014, 544 p.
13. Etkin V. S., Aleksin B. E., Aniskovich V. M., Belyakov G. I., Bolotnikova G. A., Vorsin N. N., Dikovich S. V., Zabysnyi A. I., Komarov N. L., Kuzmin A. V., Litovchenko K. Ts., Maleev S. M., Militskii Yu. A., Mirovskii V. G., Nikitin V. V., Nikolaev E. S., Raev M. D., Pospelov M. N., Smirnov A. I., Stepanov K. G., Trokhimovskii Yu. G., Khrupin A. S., Sharapov A. N., *Mnogokanal'nyi samoletnyi kompleks dlya radiogidrofizicheskikh issledovaniy: preprint. Pr-1279* (Multichannel aircraft complex for radiohydrophysical research: preprint. Pr-1279), Moscow: IKI RAN, 1987, 43 p.
14. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., The Influence of Stratigraphy on Microwave Radiation from Natural Snow Cover, *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 2000, Vol. 14, No. 9, pp. 1265–1285.
15. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu., Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing, *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 2002, Vol. 16, No. 3, pp. 411–412.
16. Eckerstorfer M., Bühler Y., Frauenfelder R., Malnes E., Remote sensing of snow avalanches: Recent advances, potential, and limitations, *Cold Regions Science and Technology*, 2016, Vol. 121, pp. 126–140.
17. Eckerstorfer M., Vickers H., Malnes E., Grahn J., Near-Real Time Automatic Snow Avalanche Activity Monitoring System Using Sentinel-1 SAR Data in Norway, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 23, Art. 2863.
18. Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. S., El-Rayes M. A., Wu L.-K., Microwave dielectric behaviour of wet snow and soil, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1985, Vol. GE-23, No. 6, pp. 25–46.
19. Rosendahl P. L., Weibgraeber P. (2020a), Modeling snow slab avalanches caused by weak-layer failure, Part 1: Slabs on compliant and collapsible weak layers, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14, No. 1, pp. 115–130.
20. Rosendahl P. L., Weibgraeber P. (2020b), Modeling snow slab avalanches caused by weak-layer failure, Part 2: Coupled mixed-mode criterion for skier-triggered anticracks, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14, No. 1, pp. 131–145.
21. Tedesco M., *Remote sensing of the cryosphere*, Oxford: JohnWiley and Sons, 2015, 404 p.
22. Tsai Y.-L. S., Dietz A., Oppelt N., Kuenzer C., A Combination of PROBA-V/MODIS-Based Products with Sentinel-1 SAR Data for Detecting Wet and Dry Snow Cover in Mountainous Areas, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 16, Art. 1903.
23. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K., *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Dedham, MA: Artech House, 1985, 456 p.