

Анализ изменений стратиграфии снежной толщи по данным микроволновой радиометрии на частоте 3.75 ГГц для решения задач мониторинга снежного покрова

Боярский Д.А. (1), Дмитриев В.В. (2), Тихонов В.В. (1)

*(1) Институт космических исследований РАН, Москва, 117997,
Россия*

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

Для исследования снежного покрова успешно применяется микроволновое дистанционное зондирование. Дистанционные методы позволяют проводить объективные, безопасные и непрерывные наблюдения снежного покрова в различных пространственных масштабах. 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.

Доклад посвящен 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 ($T_{я}$) 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.

Формирование снежного покрова определяется как климатическими особенностями региона, так и текущими погодными условиями. Температурный фон зимы во многом определяет интенсивность процессов перекристаллизации снега и общее направление в развитии снежной толщи — 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 толщи, способствуют образованию лавиноопасных слоёв из слабосвязного снега, что в итоге снижает устойчивость снежной массы на склоне.

Рассмотрим результаты наземного эксперимента по определению частотных и угловых зависимостей радиояркой температуры снежного покрова в микроволновом диапазоне. Радиометрический полигон находился в районе Крестового перевала Военно-Грузинской дороги на высоте 2297 м над уровнем моря.





Исследование излучательных характеристик снежной среды проводилось с помощью многочастотного микроволнового измерительного комплекса. Используемый аппаратный комплекс позволял проводить измерения $T_{\text{я}}$ 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. 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. 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.

Изменение высоты и структуры снежного покрова за время проведения наблюдений приведено на рис. 2. 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 крупнозернистый. В марте в нижних горизонтах снежного покрова образовался слой глубинной изморози, состоящий из крупных ледяных кристаллов, относительно слабо связанных друг с другом.

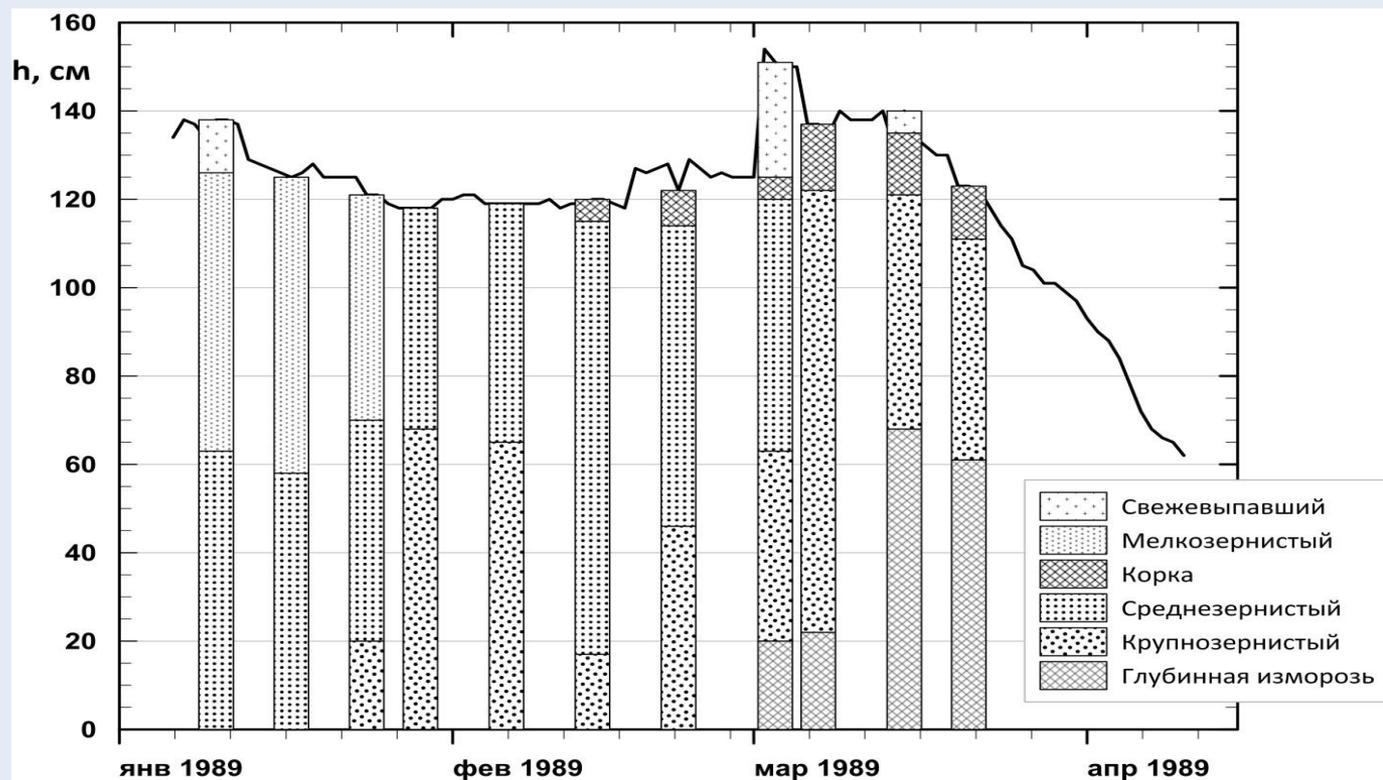


Рис. 2. Изменение высоты снежного покрова и стратиграфические разрезы снежной толщи. Измерения в шурфе выполнены: 10, 17, 24, 29 января, 6, 14, 22 февраля, 3, 7, 15, 21 марта

Зависимости $T_{\text{я}}$ от угла наблюдения приведены на рис. 3. и 4. В январе и феврале угловые зависимости соответствуют френелевским коэффициентам отражения, когда угол Брюстера ярко выражен (рис. 3), его величина различна для разных дней проведения измерений и зависит от температуры почвы под снегом. В течение снежного сезона угол Брюстера становится менее выраженным (кривая 1 на рис. 4), а в марте – апреле угловая зависимость $T_{\text{я}}$ 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.

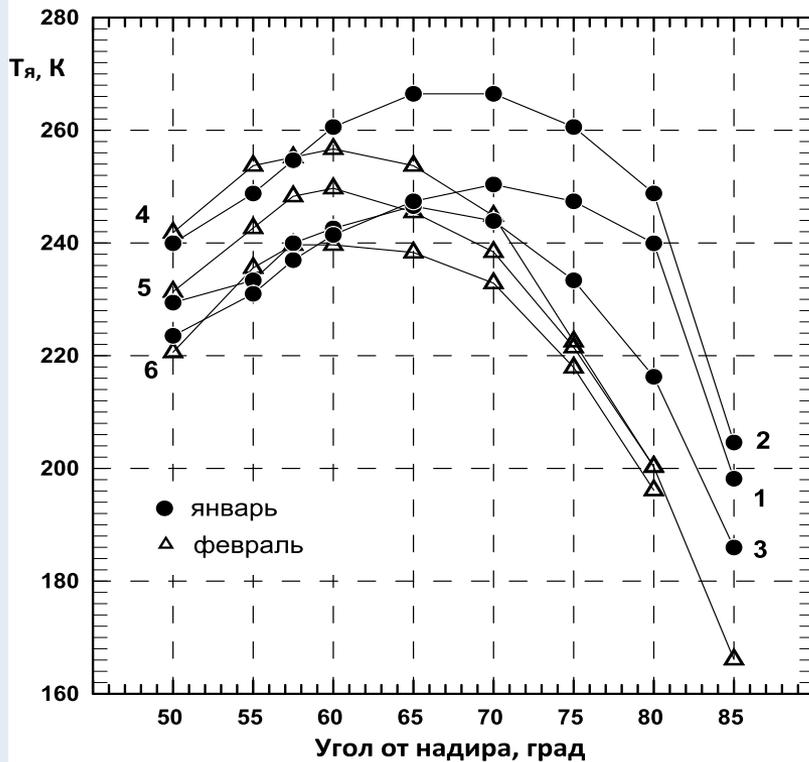


Рис. 3. Угловые зависимости радиояростной температуры снежного покрова на частоте 3,75 ГГц, вертикальная поляризация, полученные в январе и феврале. Даты измерений: 1 — 10.01.1989; 2 — 12.01.1989; 3 — 20.01.1989; 4 — 06.02.1989; 5 — 16.02.1989; 6 — 24.02.1989

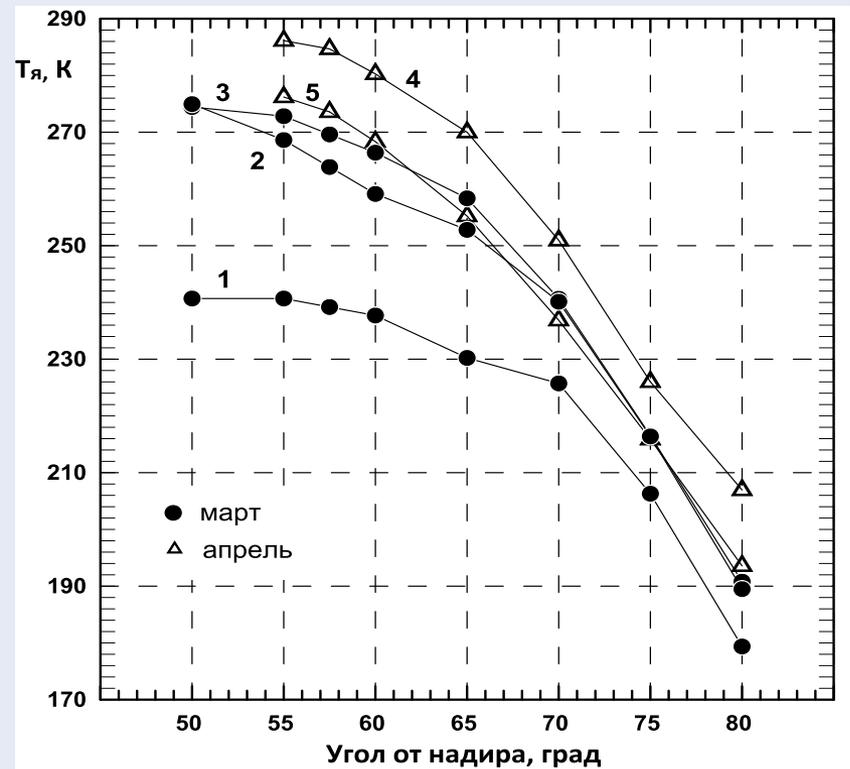


Рис. 4. Угловые зависимости радиояростной температуры снежного покрова на частоте 3,75 ГГц, вертикальная поляризация, полученные в марте и апреле. Даты измерений: 1 — 03.03.1989; 2 — 16.03.1989; 3 — 22.03.1989; 4 — 02.04.1989; 5 — 09.04.1989

Заключение

Рассмотрены результаты измерений угловых зависимостей радиояркостной температуры снежного покрова, лежащего на поверхности земли, на радиометрическом полигоне в районе Крестового перевала Военно-Грузинской дороги на высоте 2297 м над уровнем моря. Наблюдения проводились с 9 января по 9 апреля 1989 г. в диапазоне углов $50\text{--}85^\circ$ с интервалом 5° . 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 изменения стратиграфии снежного покрова. 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 радиояркостной температуры от угла визирования. На основе обнаруженного влияния глубинной изморози на угловые зависимости радиояркостной 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 РФФИ № 18–05–00427-а, 18–05–00440-а, темы «Мониторинг» гос. регистрация № 01.20.0.2.00164.