
НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 551.578.467+551.578.468

DOI: 10.7868/S3034530825050077

Дистанционный мониторинг снежной толщи с помощью температурной рейки

М.В. Михалев✉, Л.Е. Музыченко, В.А. Лобкина

Михаил Викторович Михалев

кандидат географических наук, научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

mvmikhailiov@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-5746-3423>

Леонид Евгеньевич Музыченко

младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

allixev@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0001-5363-0397>

Валентина Андреевна Лобкина

кандидат географических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

valentina-lobkina@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-8916-0910>

Аннотация. В работе рассмотрена возможность применения температурной рейки для осуществления непрерывного мониторинга состояния снежной толщи. На основе полученных данных после проведения анализа зон температурного скачка на графике хода температур выявлены признаки таяния снежного покрова. Также установлен градиент роста ледяных кристаллов. Выполнена оценка возможности использования данных дистанционного мониторинга температуры снежной толщи для оценки плотности ее слоев и снегозапаса.

Ключевые слова: снежный покров, мониторинг температуры, ледяные кристаллы

Для цитирования: Михалев М.В., Музыченко Л.Е., Лобкина В.А. Дистанционный мониторинг снежной толщи с помощью температурной рейки // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 97–103. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050077>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Snow patch remote monitoring with the thermistor chain usage

M.V. Mikhalev, L.E. Muzychenko, V.A. Lobkina

Mikhail V. Mikhalev

Candidate of Sciences in Geography, Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
mvmikhaliyov@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5746-3423>

Leonid E. Muzychenko

Junior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
allixev@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-5363-0397>

Valentina A. Lobkina

Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
valentina-lobkina@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-8916-0910>

Abstract. The authors reviewed ability of thermistor chain usage for continuous remote snow patch condition monitoring. After analysis of derived data on jump zones in temperature curve, signs of snow patch melting were found out. The gradient of ice crystals growth was also defined. In addition, applicability of snow patch temperature remote monitoring data for evaluation of snow patch layers density and water reserve was examined.

Keywords: snow patch, temperature monitoring, ice crystals

For citation: Mikhalev M.V., Muzychenko L.E., Lobkina V.A. Snow patch remote monitoring with the thermistor chain usage. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):97–103. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050077>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Вопрос о распределении температур в снежной толще и скорости снеготаяния является одним из наиболее актуальных в современной гидрологии. Прогнозирование периодов и объемов массовой водоотдачи при таянии снежной толщи позволит максимально эффективно планировать и проводить мероприятия в период половодья. Основными факторами, влияющими на распределение температуры в снежной толще, являются изменчивость температуры воздуха, характер и температура подстилающей поверхности, стратиграфия снежного покрова. На настоящий момент существует более 20 различных эмпирических зависимостей, описывающих корреляцию между коэффициентом теплопроводности снега и плотностью снежной толщи в различных условиях [1–3]. При этом для оценки теплозащитных свойств снежного покрова используется термическое сопротивление R_s , равное отношению толщины снежного покрова h_s к коэффициенту эффективной теплопроводности снега λ_s . Таким образом, натурное определение коэффициента эффективной теплопроводности и получение данных по распределению температуры в снежной толще являются важными задачами, решаемыми при выявлении теплозащитных свойств снега. Распределение

температурных полей в снежной толще обуславливает в том числе и скорость процессов перекристаллизации и метаморфизма снега [4]. Возникновение характерных кристаллических структур влияет на диффузию водяного пара внутри снежной толщи, что увеличивает или уменьшает теплопроводность как отдельных слоев, так и толщи снега в целом.

Значения коэффициентов теплопроводности, установленные различными авторами, заметно различаются. Например, для плотности снега $0,19 \text{ г/см}^3$ коэффициент теплопроводности по Миддендорфу в 2 раза меньше аналогичного коэффициента, полученного С.А. Арцыбашевым [5]. Это несоответствие указывает на недостаточную на данный момент изученность теплопроводности снега и ее зависимости от плотности снега. Таким образом, существует необходимость натурного определения данных параметров.

Получение массива данных о температуре снежной толщи при полевых работах представляет собой сложную задачу. Ртутные термометры имеют высокую точность, но снятие результата должно происходить моментально, так как показания начинают резко изменяться при смене среды. К тому же данные термометры очень хрупкие, что необходимо учитывать при их размещении в плотном снегу или между корок различного генезиса. Электронные термометры быстро выходят из строя и после сезона активных полевых работ начинают давать расхождения данных при отрицательных значениях, введение поправок не меняет ситуацию, поскольку в зависимости от температуры воздуха величина искажения меняется. Более сложные приборы, такие как пирометры и тепловизоры, снимают показания со стенки шурфа, однако после вскрытия стенка быстро оплавляется, и реальные величины температуры сильно отличаются от показаний, снимаемых со вскрытой поверхности.

Особый интерес представляет не разовое измерение температуры снежной толщи, а продолжительная запись изменений температуры в определенном слое или на конкретной глубине снежной толщи. Это позволяет сделать температурные логгеры и инвазивные устройства постоянного мониторинга температуры снежной толщи.

Таким образом, целью исследования является оценка возможности использования температурной рейки при ведении дистанционного мониторинга температуры снежной толщи для определения периодов активного таяния и величины снегозапаса.

Методика исследований

В соответствии с целью работы на опытной площадке в границах г. Южно-Сахалинска была установлена термокоса с температурными датчиками, расположенными через каждые 2 см начиная от поверхности почвы. По средствам стационарной системы одновременных автоматических измерений и регистрации температуры снега проводился постоянный мониторинг состояния снежной толщи. Микроконтроллер через цифровой интерфейс опрашивал температурные датчики, расположенные на инвазивной рейке, и передавал полученные сведения на электронный носитель. Погрешность датчиков измерения температуры составляет не более $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Данная система позволила точно определить время начала активного снеготаяния и слою активной водоотдачи. После установки и включения термокосы производилась непрерывная запись показаний с датчиков на электронный носитель с дискретностью 30 с.

Период проведения работ – зимние сезоны с 2018 по 2024 г., параллельно проводились натурные наблюдения структуры и текстуры снежной толщи, определялись плотность слоев снежной толщи, размеры ледяных кристаллов.

Особое внимание уделялось плотности снежного покрова, так как одной из задач исследования была оценка возможности установления плотности снежной толщи через величину теплопроводности.

Величина теплопроводности коррелирует с плотностью снежного покрова – коэффициент теплопроводности снега является функцией от его плотности [6, 7]. При этом у разных авторов эмпирические зависимости значительно отличаются друг от друга. Для оценки возможности определения величины плотности снежного покрова исходя из показаний температурной рейки проводился сравнительный анализ данных, полученных по различным методикам выявления зависимости величины теплопроводности от плотности снега (табл. 1).

Таблица 1

Формулы зависимости величины теплопроводности от плотности снега

Метод	Формула
Уравнение Абельса	$\lambda = 0,0068\rho^2$
Зависимость Б.В. Проскурякова	$\lambda = 0,02093 + 1,01\rho$
Зависимость А.В. Павлова	$\lambda = 0,00349 + 0,000352\rho - 2,6 \cdot 10^{-7}\rho^2 + 2,62 \cdot 10^{-9}\rho^3$
Формула Н.И. Шендера	$\lambda = 0,06 + 0,564\rho + 1,31\rho^2$
Формула Н.И. Осокина	$\lambda = 9,165 \cdot 10^{-2} - 3,814 \cdot 10^{-4}\rho + 2,905 \cdot 10^{-6}\rho^2$
Формула И.К. Янсона	$\lambda = 0,00005 + 0,0019\rho + 0,006\rho^4$

Расчет теплопроводности осуществлялся по формуле Пуассона по средствам измерения амплитуды колебаний температуры слоя снежной толщи

$$\lg A_x = \lg A_0 - B_x,$$

где A_x – амплитуда температур в слое x ; A_0 – амплитуда температур на поверхности;

$$B = \lg e \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\pi}{T}}; \quad a^2 = \frac{\pi(\lg e)}{TB^2};$$

a – коэффициент теплопроводности; T – период наблюдения.

Результаты исследований

Анализ данных, полученных с термокосы, позволяет установить период начала активного снеготаяния по резким скачкам температуры в снежной толще. Данные скачки (рис. 1), по мнению авторов, объясняются просачиванием и последующим замерзанием талой воды в снеге. Такое просачивание характерно для периода максимальной водоотдачи снежного покрова. Температурные скачки фиксировались во всех зимних сезонах наблюдений, в которых использовалась термокоса.

Рассмотрим скачки температуры в период водоотдачи за 2018 г. (см. рис. 1). Амплитуда температур до 06.04 в слое снега, расположенного на высоте 10 см от подстилающей поверхности, составляла в среднем 0,2 °С, затем амплитуда температур с 06.04 по 10.04 увеличилась до 3 °С. В период с 11.04 по 13.04 наблюдались отрицательные дневные температуры, что остановило процесс таяния, и амплитуда температур в слое на высоте 10 см уменьшилась до 0,2 °С. С 13.04 процесс таяния возобновился, и амплитуда температур возросла, а к 15.04 сравнялась с амплитудой температур в атмосфере.

Данный метод можно использовать для прогнозирования начала половодья и информирования заинтересованных структур.

Температурный градиент в снежной толще определяет динамику роста ледяных кристаллов. После определения с помощью термокосы амплитуды температур в слоях снежной толщи был проведен сравнительный анализ скорости роста ледяных кристаллов (рис. 2). Для анализа был выбран слой, расположенный на высоте 10 см от поверхности почвы. Анализ показал, что максимальный рост размера кристаллов наблюдался в период с 03.01 по 17.01.2018 г. Именно в данный период отмечается резкое изменение амплитуды температур в исследуемом слое (с 4 до 11 °С). Затем при уменьшении амплитуды температур

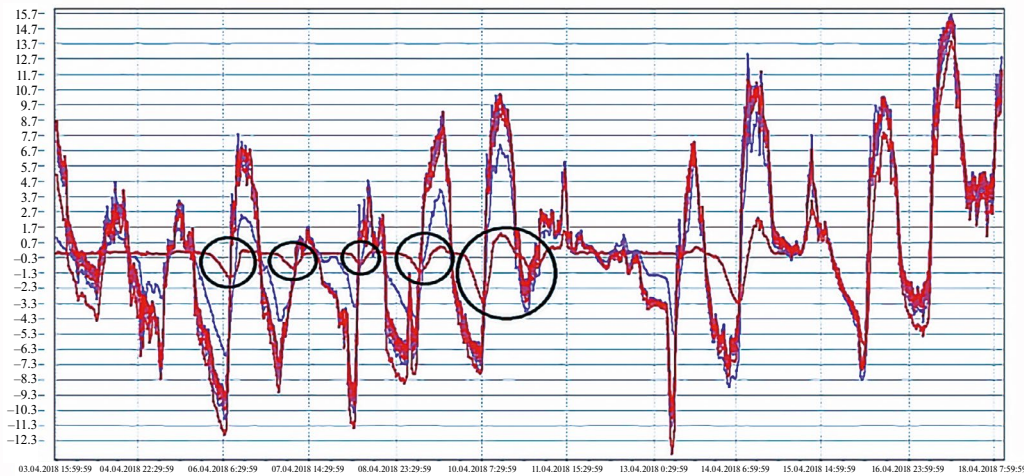


Рис. 1. Данные хода температур в снежной толще на разных глубинах. Выделенные участки показывают просачивание талых вод в нижние слои снежной толщи

замедляется и рост кристаллов. Таким образом, максимальная скорость роста ледяных кристаллов наблюдалась в зоне температурного скачка.

Результаты сравнения плотности снежного покрова, полученной дистанционным методом через измерение теплопроводности, с плотностью, определенной при натурных измерениях, показывают, что в условиях Южного Сахалина наиболее точные данные дают формулы Н.И. Шендера, Н.И. Осокина, а также зависимость Б.В. Проскурякова. Для плотностей снега менее $0,1 \text{ г/см}^3$ предпочтительно использовать зависимость Б.В. Проскурякова и эмпирическую формулу Н.И. Осокина, при более высоких плотностях – зависимость Б.В. Проскурякова (табл. 2).

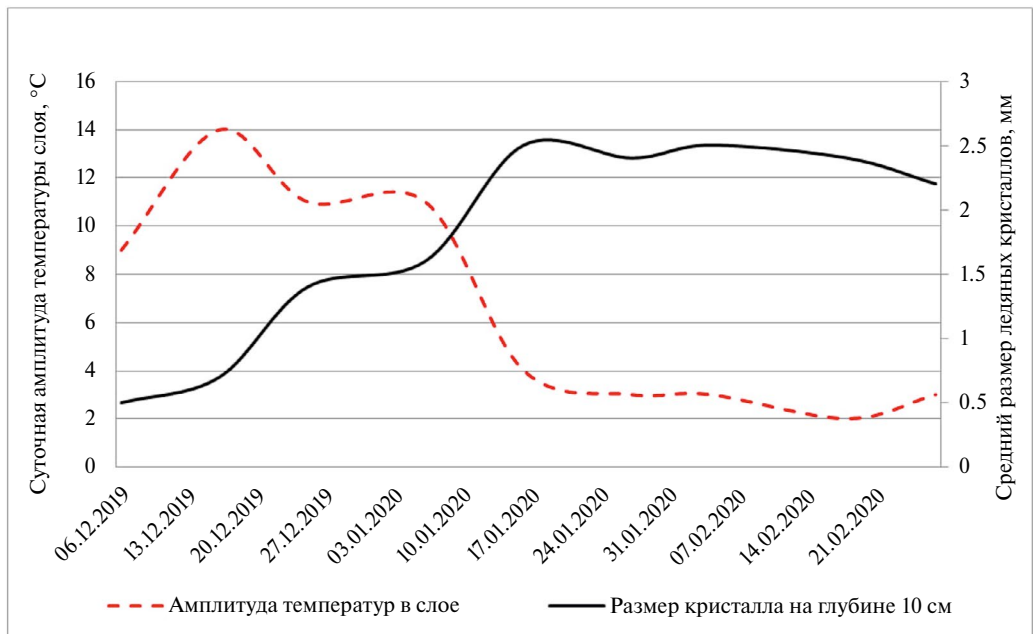


Рис. 2. Динамика роста ледяных кристаллов на глубине 10 см в зависимости от суточной амплитуды температур в слое снежной толщи

Таблица 2

Разница между показателями плотности, полученными по различным эмпирическим закономерностям, и натурно измеренными величинами, %

Плотность, г/см ³	Зависимость Б.В. Проскурякова	Формула Н.И. Шендера	Формула Н.И. Осокина
До 0,1	+32	+55	+36
0,1–0,14	+18	+22	–22
0,15–0,19	+13	+14	–45
0,2–0,24	+10	+12	–58
0,25–0,29	+8	+14	–66
0,3–0,34	+7	+17	–71
Более 0,35	+1,5	+13	–75

Выводы

Применение систем дистанционного мониторинга температуры снежной толщи позволяет оперативно определять время и интенсивность снеготаяния, а также выявлять активные слои водоотдачи через температурные скачки, которые можно отследить в реальном времени.

К началу периода снеготаяния по всей толще температура снега выравнивается, градиенты уменьшаются до десятых долей градуса на сантиметр.

Использование инвазивной рейки дает возможность определить и амплитуду хода температур в конкретных слоях снежной толщи, что позволяет сделать прогноз динамики роста ледяных кристаллов в снежной толще. Это, в свою очередь, показывает вероятность образования ослабленных слоев разрыхления. Получение данных о времени формирования ослабленных слоев снежной толщи делает более точным прогноз времени и вероятности формирования лавин эпигенетического класса.

Расчет теплопроводности снега показывает возможность применения температурной рейки при прогнозировании снегозапаса. Для свежеснежавшего снега наиболее точные значения плотности показала формула Н.И. Осокина. При средних плотностях снега около 0,35 г/см³ наиболее эффективным видится использование эмпирической зависимости Б.В. Проскурякова. Таким образом, на период максимальных снегозапасов наиболее точные значения дает зависимость Б.В. Проскурякова.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В. Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта // Лёд и Снег. 2013. № 1 (121). С. 93–103.
- Факаева Н.Р., Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Хацкевич Б.Д. Теплофизические характеристики снежного покрова Екатеринбурга // Криосфера Земли. 2025. Т. 29, № 2. С. 64–73.
- Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 193 с.
- Войтковский К.Ф., Голубев В.Н., Сазонов А.В., Сократов С.А. Новые данные о коэффициенте диффузии водяного пара в снеге // МГИ. 1988. № 63. С. 76–81.
- Борисов В.А., Акинин Д.В., Гасилина М.А., Романова А.Р. Теплопроводность снежного покрова и физические процессы, происходящие в нем под влиянием температурного градиента // Resources and Technology. 2023. Т. 20 (4). С. 45–73.
- Котляков В.М., Сосновский А.В., Осокин Н.И. Оценка коэффициента теплопроводности снега по его плотности и твердости на Западном Шпицбергене // Лёд и Снег. 2018. Т. 58, № 3. С. 343–352.

7. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 3. С.60–68.

REFERENCES

1. Osokin N.I., Sosnovskij A.V., Nakalov P.R., Nenashev S.V. Termicheskoe soprotivlenie snezhnogo pokrova i ego vliyanie na promerzanie grunta. *Lyod i Sneg*. 2013;121(1):93–103. (In Russ.).
2. Fakaeva N.R., Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Khaczkevich B.D. Teplofizicheskie harakteristiki snezhnogo pokrova Ekaterinburga. *Kriosfera Zemli*. 2025;29(2):64–73. (In Russ.).
3. Balobaev V.T. Geotermya merzloj zony litosfery severa Azii. Novosibirsk: Nauka; 1991. 193 p. (In Russ.).
4. Vojtkovskij K.F., Golubev V.N., Sazonov A.V., Sokratov S.A. Novye dannye o koefficiente diffuzii vodyanogo para v snege. *MGI*. 1988;63:76–81. (In Russ.).
5. Borisov V.A., Akinin D.V., Gasilina M.A., Romanova A.R. Teploprovodnost snezhnogo pokrova i fizicheskie processy, proisxodyashhie v nem pod vliyaniem temperaturnogo gradienta. *Resources and Technology*. 2023;20(4):45–73. (In Russ.).
6. Kotlyakov V.M., Sosnovskij A.V., Osokin N.I. Ocenka koefficienta teploprovodnosti snega po ego plotnosti i tverdsti na Zapadnom Shpiczbergene. *Lyod i Sneg*. 2018;58(3):343–352. (In Russ.).
7. Osokin N.I., Sosnovskij A.V., Chernov R.A. Koefficient teploprovodnosti snega i ego izmenchivost. *Kriosfera Zemli*. 2017;21(3):60–68. (In Russ.).