

Научная статья

УДК 551.57; 911.2

DOI: 10.24412/2658-4255-2024-3-43-54



EDN: EYTXJL

Для цитирования:

Янченко Н.И. Изменение солнечной радиации и высоты снежного покрова в марте. Иркутск // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 3. С. 43-54. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-3-43-54>

Получена: 26.06.2024
Принята: 02.10.2024
Опубликована: 24.10.2024

For citation:

Ianchenko N.I. Changes in solar radiation and snow depths in March. Irkutsk. Russian Arctic, 2024, vol. 6, no. 3, pp. 43-54. (In Russian). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-3-43-54>

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Финансирование.

Исследование не имело финансовой поддержки



ИЗМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В МАРТЕ. ИРКУТСК

Н.И. Янченко

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

E-mail: fduecn@bk.ru

Аннотация

Снежный покров является неотъемлемой и важной составляющей природно-климатических и хозяйственных особенностей Сибири. В связи с этим статья посвящена изучению изменений высоты снежного покрова в Иркутске, полученных на основе анализа данных поисковых научно-организационных натурных исследований на площадке нижнего стадиона Иркутского национального исследовательского технического университета. Измерения температуры в слоях по высоте снежного покрова выполнены с помощью автономного автоматического атмосферно-снежного измерительного комплекса и пересчитаны на высоту снежного покрова. Измерения солнечной радиации выполнены с помощью сенсора Vantage. Проведена интерпретация результатов натурных измерений температуры в снежном покрове, солнечной радиации и определены качественно-количественные характеристики изменения высоты снежного покрова и солнечной радиации в марте. Приведена динамика высоты снежного покрова в марте 2021, 2023, 2024 годов. Установлено, в марте 2021 и 2024 годов наблюдался равномерный сход снежного покрова, с отрицательными коэффициентами корреляции $-0,86$ и $-0,90$, а в марте 2023 года был отмечен неравномерный сход снежного покрова с коэффициентом корреляции $-0,29$. Интенсивный сход снежного покрова наблюдался в третьей декаде марта 2023, 2024 годов. В статье показана динамика суточной суммы суммарной солнечной радиации в марте 2023 и 2024 годов. Проведено сравнение натурных измерений 2023 года с актинометрическими данными Иркутского УГМС 2023 года. Проведено сравнение между суточной суммой суммарной солнечной радиацией и высотой снежного покрова в марте, установлены коэффициенты корреляции.

Ключевые слова: снежный покров, высота, солнечная радиация, Иркутск

CHANGES IN SOLAR RADIATION AND SNOW DEPTHS IN MARCH. IRKUTSK

N.I. Ianchenko

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

E-mail: fduecn@bk.ru

Abstract

Snow cover is an integral and important component of the natural, climatic and economic characteristics of Siberia. In this regard, the article is devoted to the study of changes in the depth of snow cover in Irkutsk, obtained on the basis of exploratory scientific and organizational field studies at the site of the lower stadium of the Irkutsk National Research Technical University. Temperature measurements in layers along the height of snow cover were carried out using an autonomous automatic atmospheric-snow measuring complex and recalculated to the depth of snow cover. Solar radiation measurements were carried out using the Vantage sensor. The results of field measurements of temperature in the snow cover, solar radiation were interpreted and qualitative and quantitative characteristics of changes in the depth of snow cover and solar radiation in March were determined.

The dynamics of snow cover depth in March 2021, 2023, 2024 are given. It was established that in March 2021 and 2024, a uniform melting of snow cover is observed, with negative correlation coefficients of -0.86 and -0.90, in March 2023, the correlation coefficient is -0.29. But intensive snow cover melting is observed in the third ten-day period of March in 2023, 2024. The dynamics of the daily sum of total solar radiation in March 2023 and 2024 is shown. A comparison of in-kind measurements in 2023 with actinometric data of the Irkutsk UGMS in 2023 was made. A comparison was made between the daily sum of total solar radiation and the depth of snow cover in March, and correlation coefficients were established.

Keywords: snow cover, height, solar radiation, Irkutsk

Введение

Снежный покров является важной составляющей природно-климатических особенностей холодных регионов, он обеспечивает экосистемы водой, а также играет ключевую роль в радиационном балансе Земли [1]. Практически на всей территории Российской Федерации есть снежный покров в холодный период года. В связи с этим территориальная изменчивость характеристик снежного покрова важна и может быть учтена для принятия локальных, региональных или глобальных многоплановых эколого-экономических решений в различных отраслях, например, таких, как строительство, эксплуатация транспорта, сельское, лесное и водное хозяйство, индустрия зимних видов отдыха и других.

Общеизвестно, что текущие наблюдения за снегопадом и высотой снежного покрова на месте доступны на земном шаре лишь изредка. Традиционно высота снежного покрова определяется на метеостанциях как среднее значение из показаний трех снегомерных реек [2].

В настоящее время появляются новые инструменты цифрового мониторинга высоты снежного покрова. О новом подходе к оценке высоты снежного покрова, с использованием геодезической станции GPS, пишут Юй К., Бан В., Чжан С., Юй Х [3]. Исследователи В.В. Калинин, А.В. Устинов, Н.С. Косарев [4] оценили точность определения высоты снежного покрова этим методом.

Например, мониторинг с применением беспилотного летательного аппарата позволяет оценить высоту снежного покрова и в дальнейшем предположить влияние времени таяния снега на рост лугов [5]. Авторы [5] пишут, что «основная цель — пролить свет на связь между сезонной эволюцией озеленения лугов и датой таяния снега, а также высотой снежного покрова».

Д.В. Турков, В.С. Сократов предлагают рассчитать толщину снежного покрова и пишут: «...предложенная методика расчёта характеристик снежного покрова будет давать хорошие результаты и на территориях с редкой сетью станций наблюдений, для которых, наряду с данными наблюдений, имеются метеоданные реанализа ERA Interim» [6].

Leo-Juhani Meriö и соавторы [7] указывают на применение автоматических регистраторов температуры для измерения локальных и микромасштабных изменений температуры снежного покрова, чтобы понять процессы и скорость таяния снега в субарктической северной Финляндии [8].

О.Я. Масликова с соавторами [8] указывает, что «при расчете процесса снеготаяния снега в конкретной географической области мы можем получить из различных источников все необходимые данные (интенсивность солнечной радиации..., альбедо в данных районах и его временной изменчивости, а также прогноз облачности и карты распределения температур над нужным регионом) для решения системы уравнений (1) – (4), полностью описывающей процесс снеготаяния» [8]. Система уравнений, включает формулу определения скорости таяния (M), уравнение теплового баланса (E_{melt}), изменение интенсивности радиации на глубине СП по закону Бугера-Ламберта ($I_{(z)}$), изменение падающей радиации (I) [8].

О влиянии солнечной активности на снежный покров Прибайкалья пишет Н.Н. Воропай, в публикации указано, что «в периоды повышенной солнечной активности наблюдаются наибольшие положительные отклонения высоты снежного покрова. При пониженной солнечной активности фиксируются как положительные, так и отрицательные аномалии, небольшие по абсолютной величине» и «...промежутки времени между двумя максимумами и двумя минимумами равен 11–12 годам, т.е. совпадает с 11-ти летним циклом солнечной активности» [9].

Об актинометрических наблюдениях Росгидромета указано в РД [10]. В РД 52.04.562—96 указано, что пункт актинометрических наблюдений должен быть организован только на базе действующей метеорологической станции и его деятельность согласована с Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова (ГГО) [10].

А.А. Прохоров пишет о применении метеостанции Vantage Pro2 Plus (DAVIS Instruments) для регистрации уровня солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) для сопоставления циркадных ритмов температуры листьев растения и точки росы [11].

В данном исследовании на основании автоматического измерения температуры в снежном покрове сделан пересчет и определена высота (толщина) снежного покрова. Также применен сенсор Vantage для регистрации суммарной солнечной радиации.

В связи с этим цель работы: качественно-количественное сравнение суммарной солнечной радиации и высоты снежного покрова в марте в Иркутске на основании натуральных наблюдений, выполненных на площадке ИРНИТУ.

Методика и район исследования

Возможно, что в Иркутске (52.17°N , 104.18°E) снежный покров можно характеризовать как «снег бореальных лесов», если принять классификацию типов снега, основанную на диапазонах географических координат в градусах северной широты и предложенную исследователями [12]. В работе [12] указана, что «классификация типов снега по трем классам: снег бореальных лесов ($47\text{--}58^\circ$ с.ш.), снег тундры ($58\text{--}74^\circ$ с.ш.) и снег полярной пустыни ($74\text{--}83^\circ$ с.ш.)...». Поисковая экспериментальная площадка для наблюдений за снежным покровом находится на территории Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) в городе, в районе жилой застройки.

Автономный автоматический атмосферно-снежный измерительный комплекс [13] впервые был установлен недалеко от нижнего стадиона ИРНИТУ в январе 2021 года (первый полевой сезон). Комплекс включает измерительную рейку (термокоса) длиной 40 см с малогабаритными цифровыми датчиками температуры, расположенными через 2,5 см по высоте термокосы, солнечную батарею, контроллер (рис. 1). С ноября 2021 года (второй полевой сезон) измерительный комплекс оснащен датчиком суммарной солнечной радиации Vantage Pro2™ (табл. 1). 28 октября 2023 года, в четвертый полевой сезон 2023/2024 годов, комплекс установлен (рис. 1) на нижнем стадионе ИРНИТУ (как и в третьем сезоне 2022/2023 годов), который имеет травяное покрытие.

Результаты и обсуждение

Измерительный комплекс настроен для регистрации температуры (T) каждый час и результаты передаются на удаленный сервер, всего 408 значений T в сутки ($24 \text{ часа} \times 17 \text{ датчиков-регистраторов}$). Высота рейки 40 см, на которой 17 датчиков-регистраторов расположены через каждые 2,5 см.

Для обработки численных результатов эксперимента применялся Microsoft Excel, содержащий программы для работы с электронными таблицами и инструмент визуализации данных.

Высота снежного покрова (СП) определяется по относительно резкому изменению температуры T на границе воздух-поверхность снежного покрова [13], в данном случае в 6 утра (рис. 2 а, б, в). Динамика температуры по высоте термокосы показана на рисунке 2. На рисунке 2 (а) показано фактическое изменение температуры по высоте рейки, для примера, только в отдельные часы, в 3, 6, 9, 12, 15, 18 часов одних суток 01 марта 2024 года. В темное время суток (3 и 6 часов) происходит наиболее резкое изменение температуры на границе атмосфера-снежный покров, это можно видеть по поведению линий на рисунке 2 (а), т.е. по изменению «хода» температур можно указать фактическую высоту снежного покрова. В данном исследовании принято 6 утра, для дальнейших сравнений высоты снежного покрова, измеренных в 6 утра в другие даты.

В 6 утра 13 марта 2023 года (рис. 2б) на поверхности снежного покрова T равна $-8,51^\circ\text{C}$ и этой T соответствует высота снежного покрова 32,5 см, в СП на высоте $H = 30 \text{ см}$ $T = -8,3^\circ\text{C}$, над снежным покровом на высоте $H = 35 \text{ см}$ $T = -8,54^\circ\text{C}$.

В 6 утра 13 марта 2024 года (рис. 2в) на поверхности снежного покрова T равна $-12,6^\circ\text{C}$ и этой T соответствует высота снежного покрова 32,5 см (рис. 2в), в СП на высоте $H = 30 \text{ см}$ $T = -12,5^\circ\text{C}$, над снежным покровом на высоте $H = 35 \text{ см}$ $T = -12,3^\circ\text{C}$. В этот же день с помощью измерительной линейки определили высоту снежного покрова, результаты по графику соответствуют фактическим замерам (рис. 3).

Отмечаем, что в первый год работы комплекса в январе-феврале-марте 2021 года проверочные измерения высоты снежного покрова проводили с помощью измерительной линейки почти каждый день. Отмечаем, что в данном наблюдении принята

ошибка измерения высоты СП $\pm 2,5$ см, на основании расстояния между терморегистраторами. При высоте снежного покрова менее 10 см к полученным значениям высоты СП нужно относиться критически.

Для сравнения, в публикации [14] «разработан метод оценки глубины снежного покрова с использованием абсолютной скорости изменения скользящего среднего в качестве количественного показателя термической изменчивости». Отмечаем, что регистраторы Т в работе [14] расположены на высоте 2,5; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 120; 140 и 160 см над землей, в нашем же исследовании регистраторы расположены через 2,5 см при общей высоте рейки 40 см.

В качестве обоснования выбора времени измерения Т для дальнейшего пересчета в высоту СП приведены следующие результаты. Ранее 1 марта 2024 года в 6 часов утра фактическая высота снежного покрова составила 37,5 см, а в 14 часов кажущаяся высота снежного покрова составила 22,5 см, таким образом разница между высотами составила 15 см. (рис. 2а). На рисунке 2(б) видно, что 13 марта 2023 года ход линии Т в 6 утра и ход линии графика Т в 14 часов совпадают на высотах от 0 до 10 см, в 6 утра фактическая высота снежного покрова составила 32,5 см, в 14 часов кажущаяся высота снежного покрова составила 17,5 см. Разница между фактической и кажущейся высотами составила 15 см. Например, 10 марта 2023 года (табл. 1) в 6 утра фактическая высота снежного покрова составляла 32,5 см, в 14 часов кажущаяся высота снежного покрова составляла 20 см, разница высот составила 12,5 см.

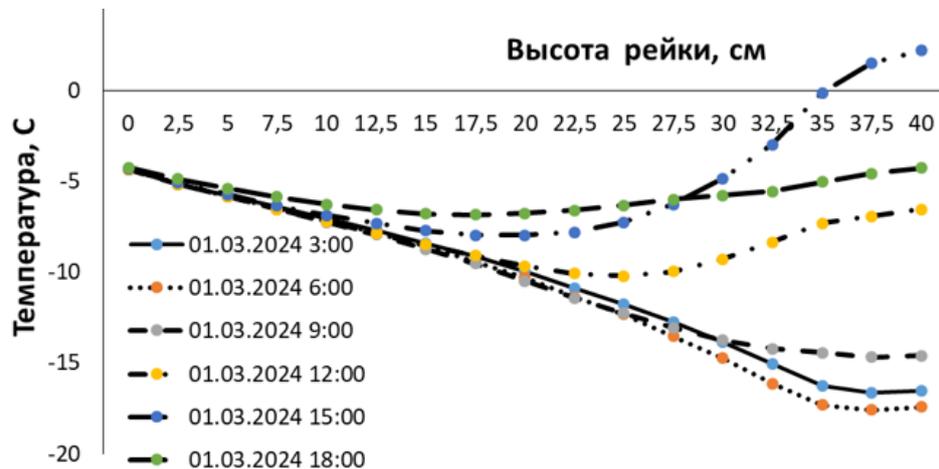
С 1 по 28 марта 2023 года разница фактических высот в 6 часов и кажущихся высот в 14 часов находилась в интервале от 12,5 до 20 см (рис. 4). Возможно, что это связано с инфракрасным излучением [8], которое как пишет О.Я. Маслякова проникает на 15-20 см от поверхности СП вглубь снежного покрова.



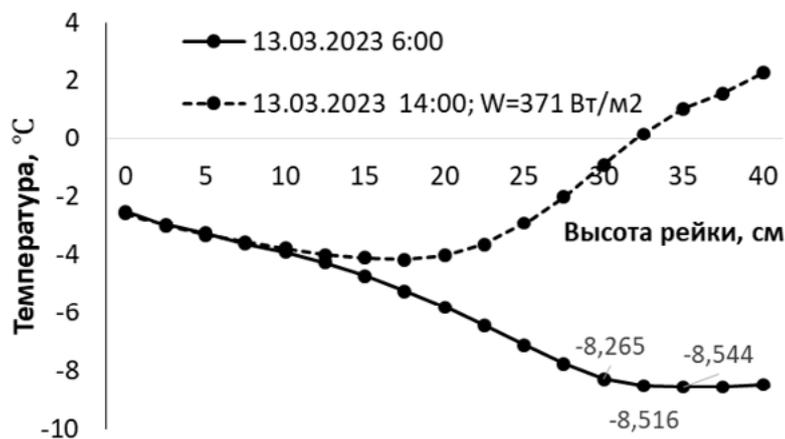
Рисунок 1. Атмосферно-снежный комплекс 28.10.2023 года, ИРНТУ



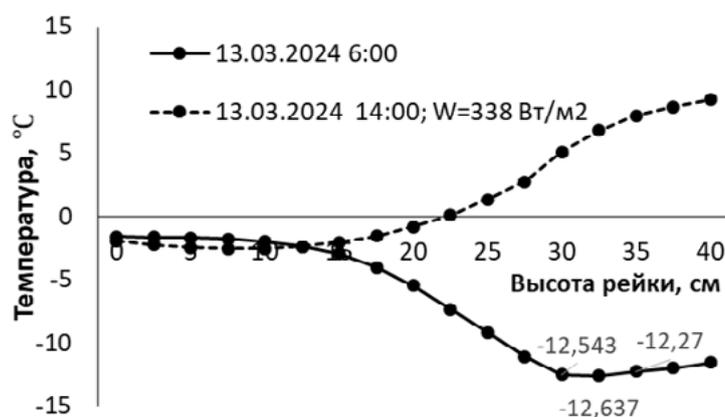
Рисунок 3. Измерительная линейка и термокоса, 10 утра 13.03.2024 года



a)



б)



в)

Рисунок 2 (а, б, в). Изменение температуры по высоте термокосы. 1.03.2024 в 3, 6, 9, 12, 15 и 18 часов, $H_{СП}^{6\text{ утра}} = 35\text{ см}$ (а); 13.03.2023 в 6 и 14 часов, $H_{СП}^{6\text{ утра}} = 32,5\text{ см}$ (б); 13.03.2024 в 6 и 14 часов, $H_{СП}^{6\text{ утра}} = 32,5\text{ см}$ (в)

Как пишет известный ученый П.П. Кузьмин [15] «солнечная радиация (прямая или рассеянная), дошедшая до снежного покрова S , в процессе встречи с его поверхностью и при прохождении через снег расчленяется на радиацию, отраженную от поверхности снега (А), поглощенную снегом (В) и прошедшую сквозь снег до глубины z (S_z)», «если поступающая на поверхность снежного покрова длинноволновая радиация целиком поглощается в самом верхнем слое снега толщиной всего в несколько миллиметров, то солнечная радиация может проникнуть в ощутимых размерах в зависимости от состояния снега (структуры, плотности и влажности) на глубину до 30-50 см» [15].

При обсуждении результатов влияние облачности в данной работе не учитывается.

Таблица 1.

Фактическая и кажущаяся высота снежного покрова. Март 2023 года

Март 2023 года	$H_{\text{фактическая}}^{6\text{ часов}}, \text{ см}$	$H_{\text{кажущаяся}}^{14\text{ часов}}, \text{ см}$	$\Delta H, \text{ см} = H_{\text{фактическая}}, \text{ см} - H_{\text{кажущаяся}}, \text{ см}$
1	37,5	20	17,5
2	37,5	20	17,5
3	35	17,5	17,5
10	32,5	20	12,5
18	40	22,5	17,5
23	32,5	15	17,5
26	27,5	10	17,5
28	20	2,5	17,5
29	≈ 10		
30	≈ 5		

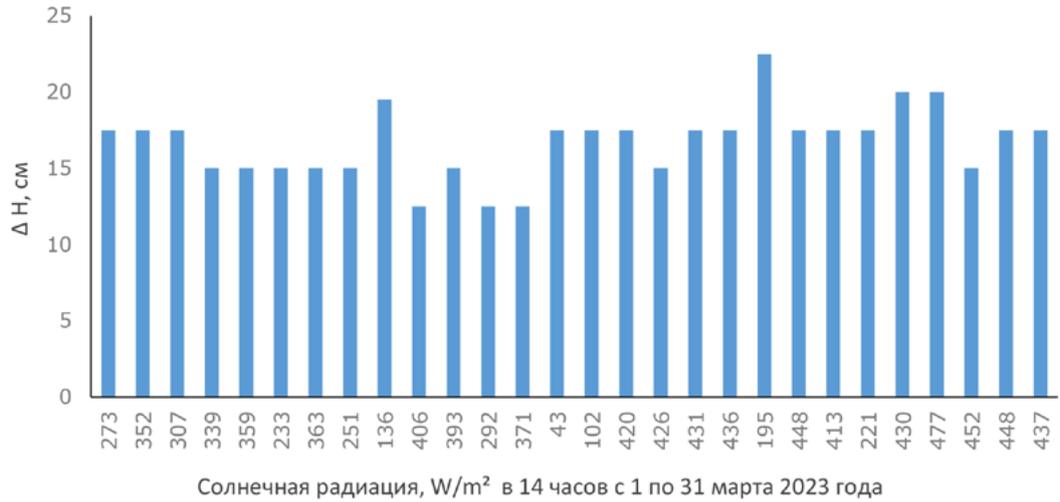


Рисунок 4. Разница высот $\Delta H, \text{ см} = H_{\text{фактическая 6 часов}}, \text{ см} - H_{\text{кажущаяся 14 часов}}, \text{ см}$, с 1 по 28 марта 2023 года

В известной работе П.П. Кузьмина [15] указано, что «процессы отражения, проникновения в снег и поглощения солнечной радиации снежным покровом находятся в зависимости от физического состояния снега и определяются коэффициентами r, ρ и a ». Где r – коэффициент отражения (альbedo), ρ – коэффициент прозрачности, a – коэффициент экстинкции (ослабления). П.П. Кузьмин также указывает уравнение ослабления проникающей в снег радиации [15] в пределах от поверхности вглубь снежного покрова, содержащее коэффициент экстинкции (см^{-1}).

Таким образом, на основании изменения T по высоте снежного покрова в марте 2023 года можно отметить, что ослабление суммарной солнечной радиации происходит от поверхности СП до глубины 12-20 см (рис. 4, табл. 1).

Изменение высоты снежного покрова в марте 2021, 2023 и 2024 годов

По данным наблюдений установлено, что средняя высота снежного покрова на площадке ИРНТУ в марте 2021 года была равна $22 \text{ см} \pm 2,5 \text{ см}$, в марте 2023 года — $31 \text{ см} \pm 2,5 \text{ см}$ (примечание: 15 и 16 марта 2023 года высота снега была больше 40 см, что выше измерительной рейки-термокосы), в марте 2024 года — $23 \text{ см} \pm 2,5 \text{ см}$ (рис. 5). Средние значения высот снежного покрова позволяют сказать, что в 2023 году снега было больше, чем в 2021 году, а в 2024 году снега было меньше, чем в 2023 году. На высоту снежного покрова в марте оказывают влияние такие факторы как: количество осадков, температура воздуха, солнечная радиация, скорость ветра, скорость испарения снега и другие.

На основании графиков динамики изменения высоты СП (рис. 5) можно отметить, что интенсивный/активный сход снежного покрова наблюдается приблизительно в третьей декаде марта, например, с 19-20 марта 2021 года, с 16-19 и с 26 марта в 2023 году и с 16-19 марта в 2024 году (рис. 5, 8, 9).

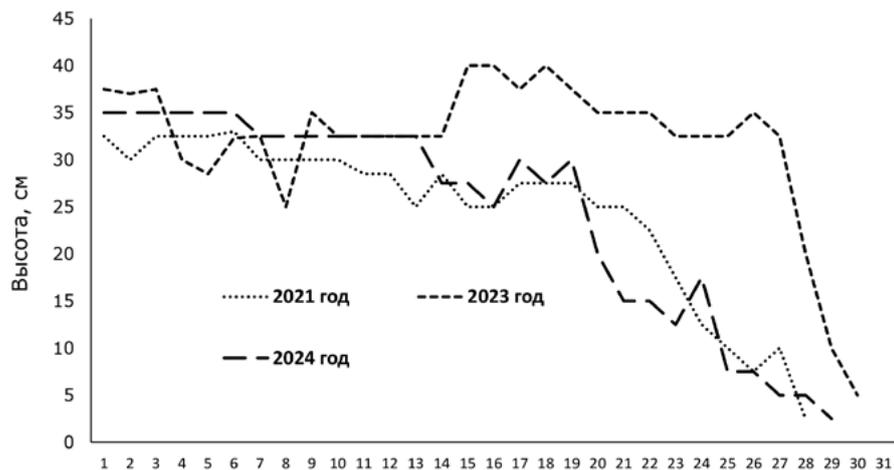


Рисунок 5. Изменение высоты снежного покрова с 1 по 31 марта в 2021, 2023, 2024 годах. ИРНТУ

Изменение солнечной радиации в марте 2023 и 2024 годов

С ноября 2021 года измерительный комплекс оснащен датчиком суммарной солнечной радиации (Vantage Pro2™ DS 6450), который измеряет солнечную радиацию и передает значения на удаленный компьютер каждый час (табл. 2), в марте 2022 года был сбой в работе комплекса и поэтому нет данных.

Vantage Pro регистрирует мгновенную (в момент измерения) суммарную (прямая и рассеянная) солнечную радиацию на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности.

На рисунках 6 и 7 показана суточная динамика суммы суммарной солнечной радиации в марте 2023 и 2024 годов. Например, суточная сумма суммарной радиации 1 марта 2023 года составила 1700 W/m² (табл.2). Сумма суммарной солнечной радиации за март 2023 года составила 73248 W/m² и за март 2024 года 67003 W/m².

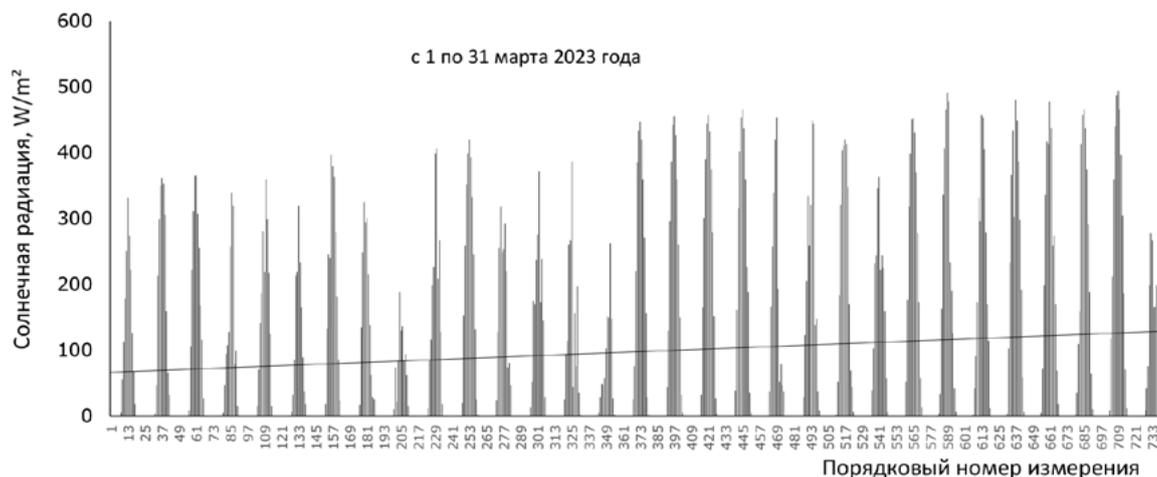


Рисунок 6. Динамика суммы суммарной солнечной радиации в сутки, 1-31 марта 2023 года

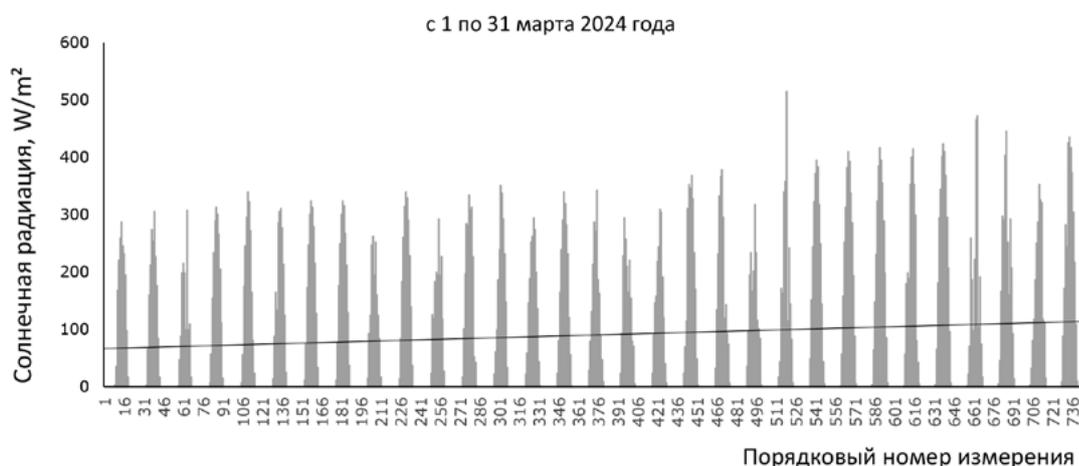


Рисунок 7. Динамика суммы суммарной солнечной радиации в сутки, 1-31 марта 2024 года

На стадионе ИРНТУ 9 марта 2023 года минимальная суточная сумма солнечной радиации составила 900 W/m², 30 марта 2023 года максимальная суточная сумма солнечной радиации составила 3560 W/m² (рис. 6). 2 марта 2024 года минимальная суточная сумма солнечной радиации составила 1380 W/m², 27 марта 2024 года максимальная суточная сумма солнечной радиации составила 3100 W/m², сумма солнечной радиации в марте составила 67003 W/m².

Проведено сравнение суммарной солнечной радиации регистрируемой Vantage на стадионе ИРНТУ 01.03.2023 года и 13.03.2023 года с данными Иркутского УГМС (табл. 2) [16]. В таблице 2 приведены часовые суммы суммарной радиации (наблюденной) на станции Иркутск (q02) [16]. В книге «Наставления гидрометеорологическим станциям и постам» [16] в п. 6.2 указано, что «результат непосредственных измерений отсчитывают по шкале измерений прибора, подключенного к актинометрическому датчику, а затем переводят в значения радиации, которые получают в киловаттах на квадратный метр (кВт/м²) для мгновенных значений радиации или в

мегаджоулях на квадратный метр (МДж/м²) для сумм радиации. Для этого используют полученное при поверке значение переводного множителя датчика с измерительным прибором или коэффициент преобразования датчика (в зависимости от типа измерительного прибора)». В связи с этим в таблице 2 приведены разные единицы измерения ИРНТУ и Иркутского УГМС в отдельные сутки марта 2023 года.

На станции Иркутск (q02) за март 2023 года сумма суммарной солнечной радиации равна 41299 (МДж/м²) *100 [16] и по данным ИРНТУ сумма суммарной солнечной радиации так же за март 2023 года равна 73248 W/m².

Таблица 2.

Солнечная радиация по данным ИРНТУ Vantage (W/m²)
и ФГБУ «Иркутское УГМС» ((МДж/м²) *100) [16],
T, °C воздуха 13.03.2023 года на высоте рейки 40 см в 14 часов

Время	W/m ²			T, °C воздуха	Время	(МДж/м ²) *100 [16]	
	1.03.2023	13.03.2023	13.03.2024			1.03.2023	13.03.2023
7:00	0	0	0	-8,339	С 6 до 7	3	3
8:00	3,4	13,4	21,8	-7,393	С 7 до 8	26	27
9:00	35,3	52,1	60,5	-4,81	С 8 до 9	67	109
10:00	168,1	174,8	99,1	-1,597	С 9 до 10	90	98
11:00	220,0	169,7	186,5	-0,653	С 10 до 11	127	109
12:00	258,9	237	238,6	-0,464	С 11 до 12	170	141
13:00	287,4	275,6	351,2	0,354	С 12 до 13	160	212
14:00	245,4	371,4	337,1	2,242*	С 13 до 14	140	212
15:00	231,9	173,1	292,3	-1,282	С 14 до 15	120	130
16:00	194,9	238,0	231,9	0,48	С 15 до 16	47	103
17:00	97,5	144,5	147,9	0,228	С 16 до 17	14	38
18:00	17	28,5	33,6	-3,991	С 17 до 18		5
19:00	0	0	0	-5,944			
Σ сутки	1760	2190	2000		Σ сутки	964	1187
среднее	160,0	170	182		среднее	88	99

Примечание: * рис. 2(б)

По данным суммарной солнечной радиации в марте 2023 года, регистрируемым Vantage Pro (W/m²) построен график с 1 по 31 марта (рис. 8а) и по данным ФГБУ «Иркутское УГМС» ((МДж/м²) *100) [16] также построен график, представленный на рисунке 8(б). Отмечаем практически одинаковые коэффициенты аппроксимации к уравнениям линейной динамики с 1 по 31 марта 2023 года R² = 0,50 (рис. 8а), с 1 по 31 марта 2023 года R² = 0,49 (рис. 8б) и с 1 по 31 марта 2024 года R² = 0,48 (рис. 9).

Изменение суммарной солнечной радиации и высоты снежного покрова в марте 2023, 2024 годов

О факторах, влияющих на снижении высоты снежного покрова Финляндии, пишет Johan Ström [17], он указывает, «что скорость абляции снега может быть связана главным образом с солнечной радиацией, поглощаемой снегом, и температурой окружающей среды. Следовательно, таяние снега ускоряется при повышенных температурах и поглощении радиации... Другие потоки энергии или процессы, влияющие на изменения SD¹, не считаются несущественными, но их суммарный эффект сравнительно невелик». В работе [17] применяют единицы измерения кДж/м² (kJm⁻²). В статье Ю. Склярова [18] приводятся значения отдельно для альбедо, поглощенной радиации и уходящей длинноволновой радиации в Северном и Южном полушарии с учетом снежного покрова, единицы измерения Вт/м², в том числе и с использованием данных спутниковых наблюдений.

На рисунках 8 и 9 показано увеличение солнечной радиации (сумма в сутки) с 1 по 31 марта 2023 и 2024 годов, коэффициенты аппроксимации для линейных уравнений практически одинаковы — 0,50 (рис. 8а) и 0,48 (рис. 9).

На рисунках 8 и 9 так же показано изменение высоты снежного покрова. Можно отметить, что в марте 2023 года высота СП изменялась не равномерно (рис. 8а,б) и активное снеготаяние было с 16-19 и с 26 марта, тогда как в марте 2024 года наблюдалось равномерное уменьшение высоты СП (рис. 9).

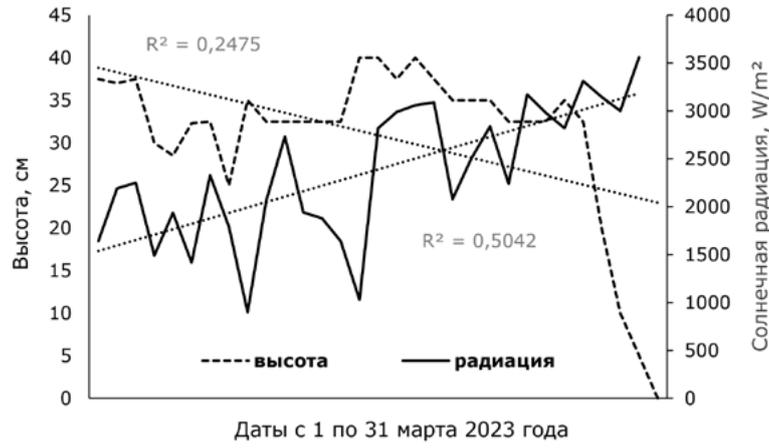


Рисунок 8(а). динамика высоты снежного покрова и динамика суточной суммы суммарной солнечной радиации (W/m^2), 1-31 марта 2023 года. ИРНТУ

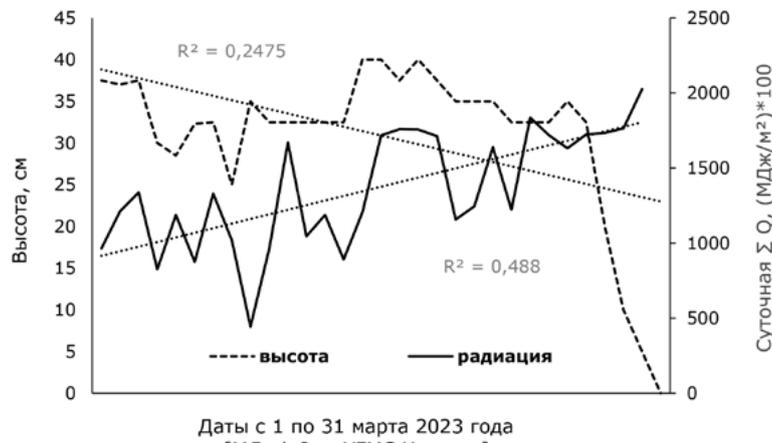


Рисунок 8(б). динамика высоты снежного покрова и динамика суточной суммы суммарной солнечной радиации, 1-31 марта 2023 года по данным Иркутского УГМС [16]

На рисунках 8 и 9 не приведены линейные уравнения динамики зависимости высоты СП от солнечной радиации, а только коэффициенты аппроксимации к ним (R^2). Корень квадратный из R^2 позволяет определить коэффициент корреляции (R) между этими переменными. Положительный или отрицательный знак R можно понять по наклону линий на рисунках 8 и 9.

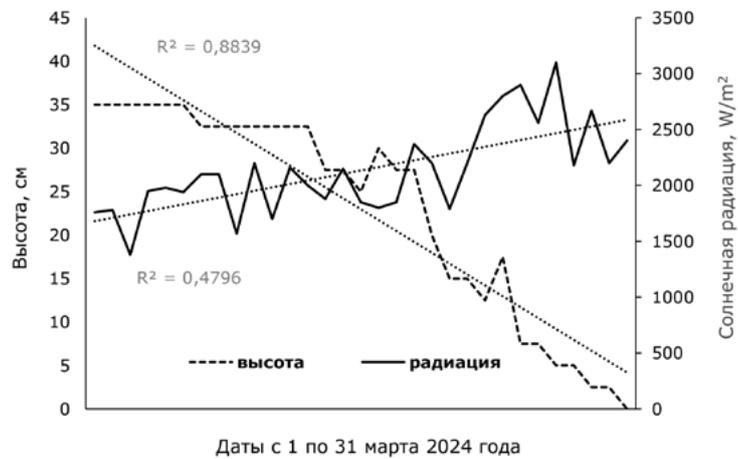


Рисунок 9. динамика высоты снежного покрова и динамика суточной суммы суммарной солнечной радиации (W/m^2), 1-31 марта 2024 года

Коэффициенты аппроксимации и коэффициенты корреляции для изменения высоты СП с 1 по 30 марта 2023 года равны $R^2 = 0,25$ и $R = -0,5$ (рис. 8 а,б) и с 1 по 27-28 марта 2024 года равны $R^2 = 0,88$, $R = -0,94$ (рис. 9). Ход линий изменения высоты СП в марте

(рис. 8, 9) показывает, что в зависимости от целей исследования можно определять коэффициенты аппроксимации для отдельных периодов или декад месяца.

Установлен отрицательный коэффициент корреляции между изменением высоты СП и суточной суммой суммарной солнечной радиации с 1 по 29 марта 2023 года равный $-0,30$ (рис. 8 а) и с 1 по 27 марта 2024 года равный $-0,76$.

Заключение

Автономный автоматический атмосферно-снежный измерительный комплекс, включающий сенсор солнечной радиации и микро датчики температуры, установлен на стадионе ИРНИТУ в Иркутске.

Высота снежного покрова определяется по относительно резкому изменению температуры на границе воздух-поверхность снежного покрова. По полученным данным установлено, что средняя высота снежного покрова на площадке ИРНИТУ в марте 2021 года равна $22 \text{ см} \pm 2,5 \text{ см}$, в марте 2023 года $31 \text{ см} \pm 2,5 \text{ см}$, в марте 2024 года $23 \text{ см} \pm 2,5 \text{ см}$.

Отмечено, что в марте 2023 года высота снежного покрова уменьшалась не равномерно, тогда как в марте 2021 и 2024 годов наблюдалось равномерное уменьшение высоты снежного покрова, об этом свидетельствуют разные отрицательные коэффициенты корреляции для динамики высоты снежного покрова. Но общим является то, что интенсивный сход снежного покрова наблюдается в третьей декаде марта.

Установлены коэффициенты корреляции между изменением высоты снежного покрова и суточной суммой суммарной солнечной радиации с 1 по 29 марта 2023 года $R = -0,30$ и с 1 по 27 марта 2024 года $R = -0,76$. При этом на основании изменения температуры в снежном покрове в марте 2023 и 2024 годов можно отметить, что солнечная радиация проникает на глубину от 12 см до 20 см от поверхности снежного покрова.

Проведено сравнение динамики суточной суммы суммарной солнечной радиации регистрируемой сенсором Vantage на стадионе ИРНИТУ с актинометрическими данными Иркутского УГМС с 1 по 31 марта 2023 года и установлены одинаковые коэффициенты корреляции.

Благодарности

Благодарю за всестороннюю помощь к.т.н., Е.А. Анциферова (ИРНИТУ), д.т.н., А.Н. Баранова (ИРНИТУ), А.В. Вайнера-Кротова (ИРНИТУ).

Список литературы:

1. Sturm M., Goldstein M.A., Parr C. Water and life from snow: a trillion dollar science question // *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53. No. 5. P. 3534-3544. DOI: 10.1002/2017WR0208402
2. Беспалов Д.П., Городецкий О.А., Федорова Е.А. и др. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. I. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 301 с.
3. Yu. K., Ban. W., Zhang. X., Yu. X. Snow Depth Estimation Based on Multipath Phase Combination of GPS Triple-Frequency Signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. № 53(9), P. 5100–5109. DOI: 10.1109/tgrs.2015.2417214
4. Калинин В.В., Устинов А.В., Косарев Н.С. Опыт использования метода ГНСС-рефлектометрии для измерения высоты снежного покрова // *Вестник СГУГиТ*. 2023. Т. 28. № 1. С. 6-13. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-6-13
5. Revuelto J., Gómez D., Alonso-González E. et al. Intermediate snowpack melt-out dates guarantee the highest seasonal grasslands greening in the Pyrenees // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. P. 18328. DOI: 10.1038/s41598-022-22391-x
6. Турков Д.В., Сократов В.С. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального тепловлагообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 3. С. 369-380. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380
7. Meria L.-J., Marttila H., Ala-aho P. et al. Snow profile temperature measurements in spatiotemporal analysis of snowmelt in a subarctic forest-mire hillslope // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Vol. 151. P. 119-132. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.03.013
8. Масликова О.Я. Экспериментальное исследование интенсивности снеготаяния на лабораторной модели // *Строительство и архитектура*. 2016. № 1. С. 28-33.

9. Воропай Н.Н., Власов В.К. Особенности распределения снежного покрова на побережье озера Байкал// Лед и снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 355–364. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-3-355-364
10. РД 52.04.562-96. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 5. Актинометрические наблюдения. Часть 1. Актинометрические наблюдения на станциях. Росгидромет, Москва, 1997. 22 с.
11. Прохоров А. А. Циркадные ритмы температуры листьев драконова дерева и количество выпадающей на них росы // HORTUS BOTANICUS, 2022. Т. 17. Url: <http://hb.karelia.ru/>
12. Royer A., Domine F., Roy A. et al. New northern snowpack classification linked to vegetation cover on a latitudinal mega-transect across northeastern Canada // *Écoscience*. 2021. Vol. 28. № 3-4. P. 225-242. DOI: 10.1080/11956860.2021.1898775
13. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A. et al. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. First International Geographical Conference of North Asian Countries «China-Mongolia-Russia Economic Corridor: Geographical and Environmental Factor and Territorial Development Opportunities». Irkutsk, 2018. Vol. 190. P. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/190/1/012031
14. García-Maroto D., Duran L., De Pablo Hernandez M.A. New approaches and error assessment to snow cover thickness and density using air temperature data at different heights // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 926. P. 171744. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171744
15. Кузьмин П.П. Физико-химические свойства снежного покрова. Ленинград: Гидрометеорология, 1957. 177 с.
16. Таблица актинометрических наблюдений по регистрации ТМ-13. Станция: Братск. Иркутск, Киренск. ФГБУ «Иркутское УГМС», 2023.
17. Ström J., Svensson J., Moosmüller H. et al. Snow cover duration in northern Finland and the influence of key variables through a conceptual framework based on observed variations in snow depth // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 903. P. 166333. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166333
18. Скляр Ю. А. Фомина Н.В., Котума А.И., Семенова Н.В. Альbedo, поглощенная солнечная радиация и уходящая длинноволновая радиация // *Известия Саратовского университета*. 2009. Т. 9. Сер. Науки о Земле. Вып. 1. С. 44–55.

References:

1. Sturm M., Goldstein M.A., Parr C. Water and life from snow: A trillion dollar science question. *Water Resources Research*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 3534-3544. DOI: 10.1002/2017WR020840
2. Bepalov D.P., Gorodeckij O.A., Fedorova E.A. et al. [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Vol. 3, part I. Meteorological observations at stations]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1985, 301 p. (In Russian).
3. Yu. K., Ban. W., Zhang. X., Yu. X. Snow Depth Estimation Based on Multipath Phase Combination of GPS Triple-Frequency Signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9), pp. 5100–5109. DOI: 10.1109/tgrs.2015.2417214
4. Kalinnikov V.V., Ustinov A.V., Kosarev N.S. Opyt ispol'zovaniya metoda GNSS-reflektometrii dlya izmereniya vysoty snezhnogo pokrova [Experience in using the GNSS reflectometry method to measure snow depth]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologij [Vestnik of SSUGT]*, 2023, vol. 28, no. 1, pp. 6-13. (In Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-6-13
5. Revuelto J., Gómez D., Alonso-González E. et al. Intermediate snowpack melt-out dates guarantee the highest seasonal grasslands greening in the Pyrenees. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, pp. 18328. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22391-x>.
6. Turkov D.V., Sokratov V.S. Raschyot karakteristik snezhnogo pokrova ravninnyh territorij s ispol'zovaniem modeli lokal'nogo teplovlagoobmena SPONSOR i dannyh reanaliza na primere Moskovskoj oblasti [Calculating of snow cover characteristics on a plain territory using the model SPONSOR and data of reanalyses (by the example of Moscow region)]. *Lyod i Sneg [Ice and Snow]*, 2016, vol. 56, no. 3, pp. 369-380. (In Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380
7. Meria L.-J., Marttila H., Ala-aho P. et al. Snow profile temperature measurements in spatiotemporal analysis of snowmelt in a subarctic forest-mire hillslope. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, vol. 151, pp. 119-132. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.03.013

8. Maslikova O.Ya. Eksperimental'noe issledovanie intensivnosti snegotayaniya na laboratornoj modeli [Experimental investigation of the intensity of snow melting on the laboratorian model]. *Stroitel'stvo i arhitektura* [Construction and architecture], 2016, no. 1. pp. 28-33. (In Russian).
9. Voropaj N.N., Vlasov V.K. Osobennosti raspredeleniya snezhnogo pokrova na poberezh'e ozera Bajkal. Led i sneg. [Features of snow cover distribution on the coast of Lake Baikal. Ice and snow]. 2017, vol. 57, no. 3, p. 355–364. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-3-355-364
10. RD 52.04.562 —96. Nastavleniya gidrometeorologicheskim stanciyam i postam. Vypusk 5. Aktinometricheskie nablyudeniya. CHast' 1. Aktinometricheskie nablyudeniya na stanciyah. [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 5. Actinometric observations. Part 1. Actinometric observations at stations]. Rosgidromet, Moskva, 1997, 22 p.
11. Prohorov A. A. Cirkadnye ritmy temperatury list'ev drakonova dereva i kolichestvo vypadayushchej na nih rosy [Circadian rhythms of dragon tree leaf temperature and the amount of dew falling on them]. *HORTUS BOTANICUS*, 2022, vol. 17. Url: <http://hb.karelia.ru/>
12. Royer A., Domine F., Roy A. et al. New northern snowpack classification linked to vegetation cover on a latitudinal mega-transect across northeastern Canada. *Écoscience*, 2021, vol. 28, no. 3-4, pp. 225-242. DOI: 10.1080/11956860.2021.1898775
13. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A. et al. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. First International Geographical Conference of North Asian Countries «China-Mongolia-Russia Economic Corridor: Geographical and Environmental Factor and Territorial Development Opportunities». Irkutsk, 2018, vol. 190, pp. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/190/1/012031
14. García-Maroto D., Duran L., De Pablo Hernandez M.A. New approaches and error assessment to snow cover thickness and density using air temperature data at different heights. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 926, pp. 171744. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171744
15. Kuz'min P.P. Fiziko-himicheskie svojstva snezhnogo pokrova. [Physical and chemical properties of snow cover. Leningrad, Publishing House: Hydrometeorology], 1957, 177 p.
16. Tablica aktinometricheskikh nablyudenij po registracii TM-13. Stanciya: Bratsk. Irkutsk, Kirensk. FGBU «Irkutskoe UGMS» [Table of actinometric observations for TM-13 registration. Station: Bratsk. Irkutsk, Kirensk. Federal State Budgetary Institution "Irkutsk UGMS"], 2023.
17. Ström J., Svensson J., Moosmüller H. et al. Snow cover duration in northern Finland and the influence of key variables through a conceptual framework based on observed variations in snow depth. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 903, pp. 166333. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166333
18. Sklyarov Yu. A. Fomina N.V., Kotuma A.I., Semenova N.V. Al'bedo, pogloshchennaya solnechnaya radiaciya i uhodyashchaya dlinnovolnovaya radiaciya. *Izvestiya Saratovskogo universiteta* [Albedo, absorbed solar radiation and outgoing long-wave radiation. Bulletin of Saratov University]. 2009, vol. 9, Ser. Nauki o Zemle. [Series: Earth Sciences.] Issue 1, p. 44–55.