

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-17-31>

УДК 556; 551.573



Испарение со снежного покрова на арх. Шпицберген в весенний период

И.И. Василевич¹✉, И.Л. Калюжный², А.С. Масловский¹

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

✉ vasilevich@aari.ru

ИИВ, 0000-0002-0918-0576; ИЛК, 0009-0001-3653-1538; АСМ, 0009-0003-0572-9255

Аннотация. Испарение с поверхности снежного покрова играет значимую роль в водном балансе водных объектов арктических архипелагов. ФГБУ «АНИИ» проводит сезонные наблюдения за испарением с поверхности снежного покрова на арх. Шпицберген с 2021 г. Цель работы — обобщить результаты произведенных наблюдений. Натурные инструментальные наблюдения производятся с использованием испарителей ГГИ-500-6, в непосредственной близости от метеостанции п. Баренцбург. Установлено, что в весенний период среднесуточное испарение с поверхности снега составляет 0,60 мм, днем — 0,43 мм, ночью — 0,17 мм, что составляет 40 % от дневного. Наибольшее влияние на процесс испарения оказывают скорость ветра ($r = 0,822$), дефицит влаги ($r = 0,670$) и температура воздуха ($r = 0,724$). Разработаны полуэмпирический метод и модель множественной регрессии, что позволяет восполнять пробелы в прямых наблюдениях и оценить испарение при наличии метеорологических данных. При сравнении результатов расчета использован метод П.П. Кузьмина. Средняя величина испарившейся влаги в предвесенний и весенний период в районе метеостанции п. Баренцбург, определенная этими методами, равна 35,6 мм и изменяется в пределах от 30,9 (по Кузьмину) до 40,2 мм (полуэмпирический метод).

Ключевые слова: испарение, снежный покров, методы измерения и расчета, Шпицберген

Для цитирования: Василевич И.И., Калюжный И.Л., Масловский А.С. Испарение со снежного покрова на арх. Шпицберген в весенний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):17–31. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-17-31>

Поступила 19.09.2024

После переработки 13.11.2024

Принята 15.11.2024

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Snow cover sublimation on the Svalbard during spring

Igor I. Vasilevich[✉], Igor L. Kalyuzhny², Aleksander S. Maslovskii¹

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Federal State Budgetary Institution of the State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

✉vasilevich@aari.ru

 IIV, 0000-0002-0918-0576; ILK, 0009-0001-3653-1538; ASM, 0009-0003-0572-9255

Abstract. Snow plays an essential role in mass balance of different water objects on the Arctic archipelagos, such as rivers, glaciers and lakes. Snow cover sublimation has a significant effect on the amount of water stored in the snow. The Arctic and Antarctic research institute (AARI) has been performing sublimation observations on the Svalbard archipelago as a part of mass-balance research since 2021. The aim of the paper is to summarize and process observation results. Estimates of daily sublimation were obtained based on direct observations using GGI-500-6 weighing evaporimeters with an evaporating surface area of 500 cm² and monolithic snow 6 cm thick. It was found that during the spring period the average daily sublimation rate from snow is 0.60 mm w. e., during the day it is 0.43 mm, at night it is 0.17 mm, which is 40 % of the daytime value. There is a strong correlation between daytime sublimation and total daily sublimation, with the correlation coefficient $r = 0.924$. Between night-time and daytime sublimation rates, the correlation decreases to $r = 0.742$. The greatest influence on the sublimation process comes from wind speed ($r = 0.822$), moisture deficit ($r = 0.670$), and air temperature ($r = 0.724$). Based on the observations carried out from April to May of 2021–2024, a semi-empirical calculation method and a multiple regression model have been developed. These methods allow one to fill gaps in direct observations or to estimate sublimation when meteorological data are available. The methods were compared with the calculation methodology proposed by P.P. Kuzmin. A significant correlation was established between the results calculated using these methods ($r = 0.776$). The average amount of sublimated moisture as determined by these methods near the Barentsburg weather station in pre-spring and spring periods is 35.6 mm, ranging from 30.9 (according to Kuzmin) to 40.2 mm (semi-empirical method). The seasonal sublimation value according to the multiple regression model is close to the average — 35.7 mm. The daily sublimation intensity values, calculated from reconstructed series of 119 days and determined using Kuzmin's methodology and the multiple regression model, are respectively equal to 0.63 and 0.66 mm/day. The results obtained can be used to assess the contribution of sublimation to the water balance of land surface waters in the Arctic archipelagos and the continental part of the Arctic.

Keywords: sublimation, snow cover, measurement methods, calculation methods, Spitsbergen

For citation: Vasilevich I.I., Kalyuzhny I.L., Maslovskii A.S. Snow cover sublimation on the Svalbard during spring. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):17–31. (In Russ). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-17-31>

Received 19.09.2024

Revised 13.11.2024

Accepted 15.11.2024

Введение

Испарение со снежного покрова является важной составляющей водного баланса снежной толщи. Процесс испарения в основном определяется величиной и направлением притока энергии к испаряющей поверхности, диффузионным переносом водяного пара в толще снега, турбулентным его оттоком в приземный слой атмосферы и продолжительностью залегания. В южных районах России на процесс испарения может расходоваться до 30 % запасов воды в снеге, в северных — нет аналогичных оценок, но недоучет приводит к некорректной оценке снегозапасов.

В ряде работ показано, что наибольшие величины испарения со снежного покрова, как в пределах суток, так и за весь предвесенний и весенний период, наблюдаются при снеготаянии. В этот период интенсивно испаряется квазижидкая пленка воды, образующаяся на кристаллах льда. Интенсивность ее испарения в основном зависит от притока тепла к испаряющей поверхности. Оценки, выполненные расчетным путем А.С. Постниковым [1] (по метеоданным, полученным до современного изменения климата), показывают достаточно большие величины испарения в северных регионах России. Для Кольского полуострова годовая величина испарения со снежного покрова равна 35–40 мм (здесь и далее идет речь о мм в. э.), в западной части Новой Земли — до 50 мм. По модельным оценкам, испарение в Арктике может составлять от 10 до 50 % [2] от объема осадков за холодный период, для горных районов эта величина может достигать 10–90 % [3, 4]. Отметим при этом, что и в суровых условиях Антарктики также происходит испарение (сублимация) снежного покрова [5, 6]. Инструментальные наблюдения за испарением со снежного покрова в условиях Арктики, в том числе и на островах архипелага Шпицберген и Северной Земли, полностью отсутствуют. В то же время комплексные наблюдения проводятся на территории США — в горных районах Аляски [7] и Колорадо [8] — и на территории Российской Федерации на некоторых водно-балансовых станциях Росгидромета, расположенных преимущественно в умеренных широтах [9]. Отсюда возникает основная цель работы: определить инструментальным путем величины испарения за предвесенний и весенний период года на о. Шпицберген, углубить наши знания о процессе формирования испарения со снежного покрова, в том числе и в условиях Арктики, а также усовершенствовать методику определения и расчета этой составляющей водного баланса.

Производство наблюдений за испарением со снежного покрова в условиях Арктики

Наблюдения испарения со снежного покрова производились на специально оборудованной снегоиспарительной площадке (размером 10×10 м) вблизи метеорологической станции п. Баренцбург. Станция располагается на пологом склоне, на южной окраине поселка на высоте 75 м. К западу от станции в 300 м пролегает залив Грэн-фьорд, с восточной стороны на расстоянии 400 м с юго-востока на север простирается горный хребет с крутым подъемом и высотой 250–500 м. Краткое описание окрестностей метеостанции приведено в [10]. На площадке были установлены 2 испарителя ГГИ-500-6 для определения испарения с поверхности снега, термометры ТМ-03, снегомерная рейка М-46 и снегозащитная будка для взвешивания испарителей морозоустойчивыми весами “Ohaus Valor V71P30T”. Основным прибором является взвешиваемый снеговой испаритель ГГИ-500-6 с площадью испаряющей поверхности 500 см² и высотой корпуса 6 см. Все детали прибора изготовлены из металла.

Конструктивно испаритель состоит из цилиндра, в котором располагается монолит снежного покрова, съемного дна, на которое устанавливается цилиндр, и крышки, которая закрывает его при транспортировке к месту взвешивания. В комплект прибора входит гнездо в виде емкости, в которую помещается цилиндр со снегом на период определения величины испарившейся влаги.

На снегоиспарительной площадке устанавливают два прибора таким образом, чтобы каждый был погружен в снег заподлицо с поверхностью снежного покро-

ва. Взвешивание приборов производят два раза в сутки — в 8:00 (ночной период) и 20:00 (дневной период). Потери снега на испарение определяют по разности массы испарителя в начале и конце опыта с учетом выпавших осадков. Необходимо учесть, что при измерении испарения со снега методом испарителей не учитываются величины испарения при переносе снега ветровым потоком. Производство работ по определению испарения со снежного покрова в системе Росгидромета регламентированы Методическими рекомендациями¹. Инструментальные наблюдения за испарением охватывали предвесенний и весенний периоды, от конца апреля до конца мая, с 2021 по 2024 г. Ежегодно средняя толщина снежного покрова в начальный период была в пределах от 60 до 140 см при плотности от 0,32 до 0,45 г/см³.

Наблюдения за испарением заканчиваются преимущественно после устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха выше 0 °С, когда в испарителях образуется значительное количество талой воды. Снежный покров в это время значительно уплотняется и состоит из крупных ледяных кристаллов размером 5–8 мм. Температура поверхности снежного покрова в эти периоды, как правило, держится около 0 °С.

Анализ результатов инструментальных наблюдений

Испарители типа ГГИ-500-6 не обеспечивают получение непрерывной информации из-за пропусков в наблюдениях, обусловленных снегопадами и ветровым переносом снега [11]. Так, по наблюдениям зимой 2024 г. успешными оказались 43 суток измерения из 86, среди которых только в 10 случаях были выполнены полные двухсрочные измерения в одни сутки. Данный результат является следствием погодных условий — за период наблюдения регулярно регистрировались осадки, оттепели и сильные ветра (из 43 суток 20 были без осадков).

Таблица 1

Статистические характеристики наблюдений за испарением на арх. Шпицберген за период с 2021 по 2024 г.

Table 1

Statistical characteristics of sublimation observations on Svalbard archipelago for the period from 2021 to 2024

Годы	Период наблюдений		Сроки наблюдений в сутках	
	Календарный	Продолжительность, сутки	Два срока	Один срок
2021	с 21.04 по 26.05	36	10	13
2022	с 06.05 по 20.05	15	8	4
2023	с 26.04 по 24.05	24	7	4
2024	с 15.04 по 27.05	43	10	22
Итого		118	35	55

Оценка количества выполненных измерений за период 2021 по 2024 г. приведена в табл. 1. В среднем только 28,8 % из 118 суток наблюдений без каких-либо помех были успешными. Согласно табл. 1 в 55 случаях результаты наблюдений представлены одним сроком.

¹ Методические рекомендации по производству наблюдений за испарением с почвы и снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат; 1991. 234 с.
Methodological recommendations for conducting observations of evaporation from soil and snow cover. L.: Gidrometeizdat; 1991. 234 p.

Обсуждение полученных результатов

Анализ массива данных показал (табл. 2), что среднесуточная величина испарения с поверхности снега в предвесенний период равна 0,60 мм; в дневное время 0,43 мм и в ночное время — 0,17 мм, что составляет 40 % от дневного.

Таблица 2

Массив данных инструментальных определений испарения с поверхности снега в дневное и ночное время по данным наблюдений на метеостанции п. Баренцбург

Table 2

Dataset of instrumental determinations of snow sublimation during daytime and nighttime based on observations at the Barentsburg weather station

Год	Дата	Испарение с поверхности снега, мм		
		Ночь	День	Сутки
2021	4 мая	0,05	0,02	0,07
	6 мая	0,16	0,28	0,44
	7 мая	0,01	0,48	0,40
	8 мая	0,16	0,29	0,45
	15 мая	0,06	0,42	0,48
	16 мая	0,05	0,31	0,36
	19 мая	0,00	0,35	0,35
	23 мая	0,29	0,44	0,73
	24 мая	0,10	0,51	0,61
2022	25 мая	0,35	0,53	0,88
	10 мая	0,18	0,46	0,64
	11 мая	0,10	0,28	0,38
	12 мая	0,01	0,41	0,42
	13 мая	0,06	0,37	0,43
	14 мая	0,09	0,52	0,61
	15 мая	0,20	0,44	0,64
	18 мая	0,02	0,29	0,31
2023	20 мая	0,38	0,54	0,92
	30 апреля	0,40	0,84	1,24
	1 мая	0,11	0,47	0,58
	2 мая	0,01	0,16	0,17
	8 мая	0,12	0,23	0,35
	9 мая	0,09	0,30	0,39
2024	12 мая	0,21	0,50	0,71
	19 мая	0,08	0,37	0,45
	24 апреля	0,09	0,20	0,29
	27 апреля	0,09	0,28	0,37
	03 мая	0,22	0,45	0,67
	05 мая	0,13	0,13	0,26
	06 мая	0,18	0,38	0,56
	08 мая	0,58	1,47	2,05
	17 мая	0,42	0,45	0,87
21 мая	0,32	0,55	0,87	
22 мая	0,21	0,66	0,87	
27 мая	0,35	0,74	1,09	
Среднее		0,17	0,43	0,60

Установлено, что между величинами ночного (E_n) и дневного (E_d) испарения с поверхности снега существует корреляционная зависимость вида

$$E_d = 1,295E_n + 0,2145, \quad (1)$$

при коэффициенте корреляции $r = 0,742$. Зависимость приведена на рис. 1.

Отсюда возникает тесная корреляционная зависимость между величинами дневного испарения (E_d) и испарением за сутки (E_c). Зависимость (рис. 2) возможно представить в виде уравнения

$$E_c = 1,423E_d + 0,0171, \quad (2)$$

при $r = 0,924$.

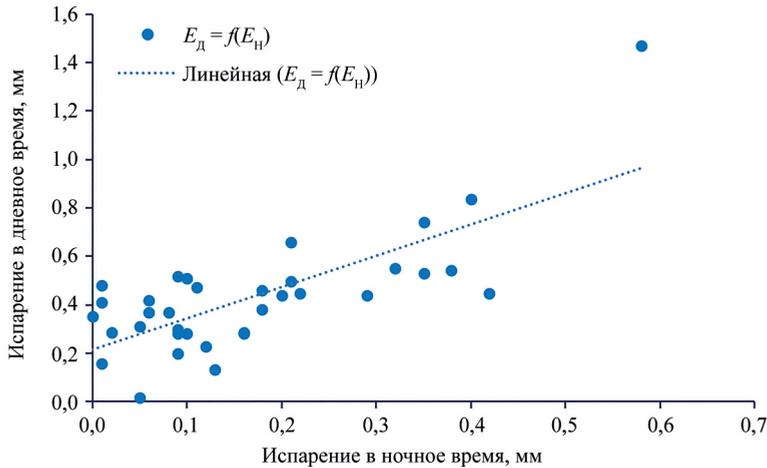


Рис. 1. Корреляционная зависимость между испарением с поверхности снега в ночное и дневное время

Fig. 1. Correlation between snow sublimation at night and during the day

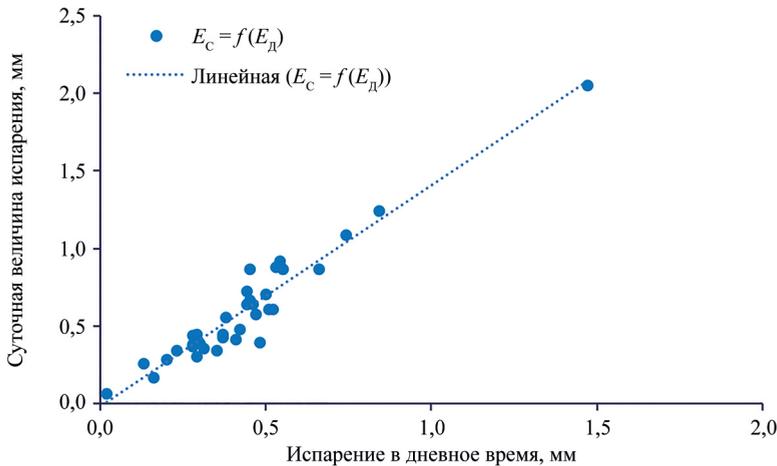


Рис. 2. Корреляционная зависимость между испарением с поверхности снега в дневное время и суточными величинами испарения. Наблюдения охватывают предвесенний период с 24 апреля по 27 мая

Полученные зависимости (1), (2) и другие используются для устранения пропусков наблюдений при расчетах суточных величин испарения с поверхности снега. При полном отсутствии наблюдений за испарением (в ночной и дневной периоды суток) представляется возможным использовать данные наблюдений по одной из приведенных ниже моделей испарения.

Факторы, определяющие испарение со снежного покрова

На основе наблюдений над элементами метеорологического режима, выполненных на метеостанции п. Баренцбург в 2024 г., методом линейного регрессионного анализа построена таблица факторов (табл. 3), влияющих на процесс испарения со снежного покрова.

В качестве независимых переменных были выбраны следующие (их среднесуточные значения): температура воздуха (T_B , [°C]), температура поверхности снега (T_{II} , [°C]), относительная влажность воздуха (H , [%]), дефицит влажности (D , [гПа]), скорость ветра на высоте 10 м (U , [м/с]); разность $P = e_0 - e_{200}$ (разность между значениями давления насыщения водяного пара по температуре поверхности снега и абсолютной влажности воздуха), [гПа], а также суммарной солнечной коротковолновой радиацией (Q , [Вт/м²]). Испарение представлено составляющими: E_H , E_D , E_C — испарения в ночной, дневной период и суммарная составляющая в мм слоя испарившейся влаги.

На этапе выбора оптимальной модели применялись разные сочетания независимых переменных уравнения множественной линейной регрессии. Выбор модели осуществлялся по следующим характеристикам — коэффициент детерминации r^2 , F -критерий Фишера, t -критерий Стьюдента, p -уровень, стандартная погрешность модели (равная СКО погрешностей модели, далее погрешность). Также при детальном рассмотрении модели внимание обращалось на величину стандартизированного регрессионного коэффициента (b^*), показывающего относительный вклад в расчет зависимой переменной, а также частные оценки t -критериев и p -уровней для каждой

Таблица 3

Корреляционная таблица факторов, обуславливающих испарение с поверхности снега

Table 3

Correlation matrix of factors causing snow sublimation

	E_H	E_D	E_C	T_B	T_{II}	H	U	Q	D	P
E_H	1	0,861	0,929	0,324	0,079	-0,322	0,402	0,125	0,429	-0,049
E_D	–	1	0,988	0,381	0,117	-0,504	0,633	0,396	0,587	0,156
E_C	–	–	1	0,724	0,228	-0,463	0,822	0,212	0,670	-0,225
T_B	–	–	–	1	0,861	0,118	0,335	-0,013	0,554	-0,113
T_{II}	–	–	–	–	1	0,158	0,178	0,010	0,428	0,307
H	–	–	–	–	–	1	-0,266	-0,458	-0,747	-0,500
U	–	–	–	–	–	–	1	-0,181	0,472	-0,058
Q	–	–	–	–	–	–	–	1	0,360	0,335
D	–	–	–	–	–	–	–	–	1	0,339
P	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1

Примечание. Полу жирным выделены значения с уровнем значимости 0,05.

Note. Values with a significance level of 0.05 are shown in bold.

независимой переменной. Все статистические характеристики рассчитывались для уровня значимости $\alpha = 0,05$. Из ряда моделей (табл. 4) была отобрана одна, чья совокупность характеристик была наиболее качественной, — $E_c = f(D, U)$.

В ряде работ при построении метода расчета суточных величин испарения в качестве основных предикторов отдают предпочтение дефициту влажности и скорости ветра. В частности, анализ результатов наблюдений на леднике Чхота Шигри в Гималаях (Индия, 2009–2020 гг.) показывает, что использование в качестве предикторов скорости ветра и дефицита давления пара является достаточно высоким показателем сублимации (испарения). Коэффициент корреляции связи суточных величин $E_c = f(U, D)$ равен 0,93 [12]. Но сочетание U и D с рядом других предикторов позволяет увеличить коэффициент корреляции до 0,96. Комплекс выполненных наблюдений на леднике Яла (Непальские Гималаи) [4] также показал, что сочетание предикторов скорость ветра и дефицит давления пара, при определении среднесуточных величин испарения, имеет коэффициент корреляции 0,88. При введении в расчет дополнительного предиктора, температуры приземного слоя, коэффициент корреляции повышается до 0,90. В работе [5] на основании 800 измерений, выполненных в условиях Антарктиды, установлено, что интенсивность сублимации снега в основном зависит от температуры воздуха и скорости ветра. В работе [2] расчет

Таблица 4

Модели расчета суточных величин испарения со снежного покрова

Table 4

Calculation models of daily snow sublimation values

Модель	Независимые переменные	Коэффициент детерминации r^2	Среднее значение b^*	p -уровень	Погрешность модели
1	U, D	0,765	0,645	$8,8 \cdot 10^{-11}$	0,181
2	T_B, U, D	0,804	0,468	$4,4 \cdot 10^{-11}$	0,168
3	P, U	0,586	0,585	$8,8 \cdot 10^{-7}$	0,240
4	T_{II}, U, D	0,816	0,496	$1,6 \cdot 10^{-11}$	0,163
5	D, U, Q	0,749	0,370	$3,9 \cdot 10^{-9}$	0,184
6	U, Q	0,456	0,348	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,271
7	T_B, Q, U, P	0,694	0,394	$3,8 \cdot 10^{-8}$	0,206

Таблица 5

Характеристики модели суточных величин испарения от дефицита влажности и скорости ветра

Table 5

Characteristics of the model of daily sublimation values based on humidity deficit and wind speed

Элемент	b^*	Стандартная ошибка b^*	b	Стандартная ошибка b	$t(5)$	p -уровень
Свободный член	–	–	–0,674	0,146	–4,61	$6,2 \cdot 10^{-5}$
U , м/с	0,742	0,086	0,177	0,021	8,61	$7,7 \cdot 10^{-10}$
D , гПа	0,548	0,086	0,718	0,113	6,35	$3,9 \cdot 10^{-7}$

Примечание. $r = 0,875$; $r^2 = 0,765$; $F(2,32) = 52,0$; $p < 8,8 \cdot 10^{-11}$; погрешность модели = 0,181 мм.

Note. $r = 0,875$; $r^2 = 0,765$; $F(2,32) = 52,0$; $p < 8,8 \cdot 10^{-11}$; STD of model residuals = 0.181 mm

испарения производят по модели SnowModel [13], используя данные о температуре воздуха, дефиците влажности, скорости ветра и также некоторых других элементов энергетического баланса поверхности снега.

Таким образом, модель, построенная на зависимости испарения от дефицита влажности и скорости ветра, является наиболее качественной по всем рассматриваемым характеристикам. Ключевым же при выборе данной модели являлось сочетание высокого коэффициента детерминации (0,765), низких значений p -уровня ($8,8 \cdot 10^{-11}$) и погрешности модели (0,181). Подробные характеристики модели приведены в табл. 5.

Согласно табл. 5, зависимость суточных величин испарения (E_C) от среднесуточного дефицита влажности воздуха (D) и скорости ветра (U) выражается уравнением линейной регрессии вида

$$E_C = 0,718D + 0,177U - 0,674 \text{ (мм)}, \quad (3)$$

при коэффициенте корреляции $r = 0,875$ (рис. 3).

В предвесенний период увеличивается приток тепла к испаряющей поверхности. Однако общая зависимость, $E_C = f(Q)$, полученная на основе обработки данных наблюдений с 2021 по 2024 г., имеет крайне низкий коэффициент корреляции. Согласно табл. 3, он равен 0,212, и подобная зависимость не может быть использована в качестве основной в расчетных схемах. Но, по данным конкретного года, 2024 г., коэффициент корреляции этой зависимости увеличивается до уровня 0,795. Уравнение зависимости суточных величин испарения (E_C) от суточной величины коротковолновой солнечной радиации (Q), построенное по данным 2024 г., имеет вид

$$E_C = 0,0029Q + 0,1431 \quad (4)$$

Зависимость испарения от температуры воздуха, как показателя притока тепла к испаряющей поверхности, имеет коэффициент корреляции 0,724. Скорость ветра, формирующая турбулентный поток воздушной массы над этой поверхностью, имеет

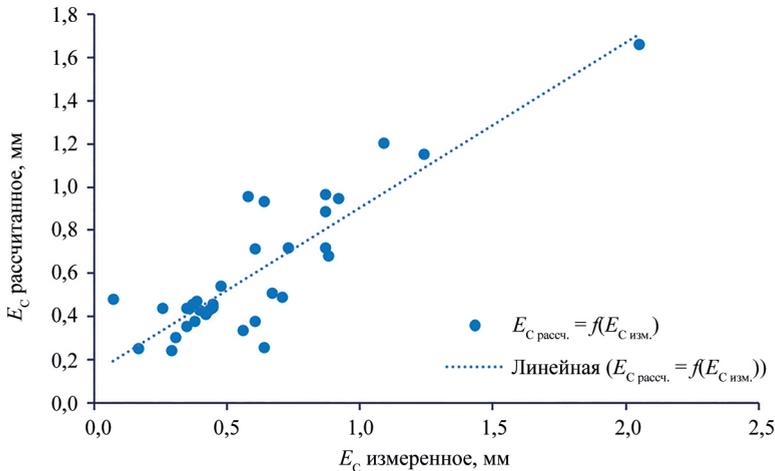


Рис. 3. Зависимость измеренных и рассчитанных суточных величин испарения со снежного покрова по модели $E_C = f(D, U)$

Fig. 3. Correlation of measured and calculated daily values of snow sublimation according to the model $E_C = f(D, U)$

более высокий коэффициент корреляции с суточной величиной испарения $r = 0,822$. Зависимость $E_c = f(U)$ описывается уравнением вида

$$E_c = 0,1901U + 0,115 \quad (5)$$

и может быть использована в расчетных схемах.

В системе Росгидромета применяют локальные, для конкретного района, методы расчета суточных величин испарения, в частности метод П.П. Кузьмина [14]. Согласно его методу, суточную величину испарения рассчитывают по формуле

$$E = (a + bu)(e_n - e_2), \quad (6)$$

где u — среднесуточная скорость ветра на высоте 10 м, [м/с]; e_n — давление насыщения водного пара по температуре поверхности снежного покрова, [гПа]; e_2 — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м, [гПа]; a и b — параметры, определяемые по данным суточных наблюдений испарения и соответствующим им среднесуточным значениям u_{10} , e_n и e_2 .

Определение параметров a и b производилось на основе измеренных суточных величин испарения и соответствующих метеорологических характеристик по данным метеостанции п. Баренцбург. Согласно методике П.П. Кузьмина, параметр a принят равным 0,18; параметр b равен 0,09. Расчетная формула для метеостанции п. Баренцбург принимает вид:

$$E_c = (0,18 + 0,09u)(e_n - e_2). \quad (7)$$

Таким образом, устранение пропусков наблюдений, а также расчет величин испарения со снежного покрова по наблюдаемым метеорологическим характеристикам возможно произвести следующими методами:

- используя комплекс уравнений (1), (2), (4) и (5) — полуэмпирический метод;
- расчет по модели $E_c = f(D, U)$ с использованием среднесуточной величины дефицита влажности и скорости ветра;
- расчет по региональному уравнению (7), основанный на методике П.П. Кузьмина.

Используя в качестве опорных данных наблюдаемые суточные величины испарения, приведенные в табл. 1, определим погрешности расчета по модели $E_c = f(D, U)$ и методу П.П. Кузьмина, а также натурных и восстановленных наблюдений за период с 2021 по 2024 г. Результаты расчета приведены в табл. 6.

Анализ результатов сравнения методов расчета испарения со снежного покрова по опорному ряду, приведенному в табл. 1, показывает, что наиболее близкие результаты свойственны модели $E_c = f(D, U)$. Достоинство полуэмпирического метода заключается в том, что он, наряду с моделью, позволяет дополнить ряд натурных измерений, что невозможно осуществить, применяя метод П.П. Кузьмина. Регрессионная модель, основанная на связи суточного испарения и средних скорости ветра и дефицита влажности, достаточно хорошо описывает исследуемый процесс (погрешность модели 0,18 мм, $r = 0,874$). Существенным недостатком модели является получение отрицательных значений испарения в дни, когда средняя скорость ветра меньше 1 м/с. Это вытекает из самого уравнения модели и является следствием отсутствия наблюдаемых величин ветра со скоростью ниже 1 м/с среди суток, использованных при разработке модели. Метод П.П. Кузьмина, в свою очередь, имеет большую погрешность (0,29 мм), чем регрессионная модель, и менее точно описывает процесс испарения ($r = 0,590$), а также требует для расчета данные о температуре поверхности снежного покрова.

Таблица 6

**Результаты сравнения методов расчета и восстановления
 величин испарения с поверхности снежного покрова**

Table 6

Results of comparison of methods for calculating and restoring sublimation values

Характеристика	Статистические характеристики 2-срочного ряда (табл. 1).			Расчет по данным натуральных наблюдений за период 2021–2024 г.		
	Опорный ряд	Модель	Метод П.П. Кузьмина	Полуэмпири- ческий метод	Модель	Метод П.П. Кузьмина
Среднее, мм/сут	0,60	0,60	0,62	0,76	0,66	0,63
СКО, мм	0,36	0,32	0,22	0,48	0,47	0,30
C_v	0,61	0,30	0,47	0,63	0,71	0,48
Погрешность абс., мм	–	0,18	0,29	–	–	–
Погрешность отн., %	–	29	49	–	–	–
Количество членов ряда	35	35	35	120	120	120

Примечание. Относительная погрешность рассчитывалась как частное абсолютной погрешности и средней величины испарения опорного ряда.

Note. The relative residual was calculated as the quotient of the absolute error and the average sublimation value of the reference series.

Таблица 7

**Результаты расчетов суточных величин испарения
 по данным метеостанции п. Баренцбург, 2024 г.**

Table 7

**Results of calculations of daily sublimation values
 according to Barentsburg weather station data in 2024**

Характеристика	Методы расчета			Среднее значение
	Полуэмпири- ческий метод	Модель	Метод П.П. Кузьмина	
Среднее, мм/сут	0,93	0,83	0,72	0,83
СКО, мм	0,60	0,64	0,36	0,53
Сумма за период с 15.04 по 27.05	40,2	35,7	30,9	35,6

Однако применение этих трех рассматриваемых методов позволяет получить достаточно полное представление о величинах испарения со снежного покрова в конкретном регионе.

В табл. 7 приведены результаты наблюдаемых и восстановленных данных по испарению с использованием упомянутых методов (метеостанция п. Баренцбург, 2024 г.). По данным таблицы, средняя величина суточных значений испарения со снежного покрова в предвесенний период составила 0,83 мм/сут. Наибольшая разность суточных величин, определенных рассматриваемыми методами, составляет 0,20 мм/сут. Средняя величина испарившейся влаги, определенная этими методами, равна 35,6 мм, изменяясь в пределах от 30,9 до 40,2 мм. Измеренные инструментальным путем ночные (7,16 мм) и дневные (13,0 мм) результаты наблюдений составляют в сумме 20,2 мм влаги, что составляет 56,7 % от среднего значения в 35,6 мм за

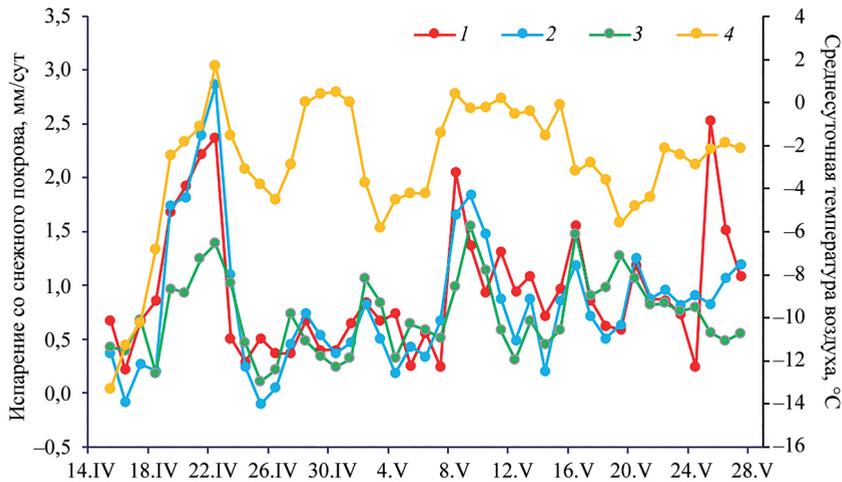


Рис. 4. Результаты наблюдений и расчета испарения за 2024 г. 1 — расчет по полумпирическому методу; 2 — расчет по регрессионной модели $E_c = f(U, D)$; 3 — расчет по методу П.П. Кузьмина; 4 — среднесуточная температура воздуха

Fig. 4. Results of observations and calculations of sublimation for 2024. 1 — calculation using the semi-empirical method; 2 — calculation using the regression model $E_c = f(U, D)$; 3 — calculation using the P.P. Kuzmin's method; 4 — average daily air temperature

рассматриваемый период. В работе [7] средняя суточная величина испарения для северной горной части Аляски (за 11 лет наблюдений, с 2010 по 2021 г.) составляла 0,08–0,10 мм/сут, а среднее годовое значение — 20–26 мм. При этом на апрель и май приходится 9,0 мм (3 мм в апреле и 6 в мае). Значительная разница в сезонных величинах испарения Аляски и Шпицбергена, вероятно, обусловлена климатическими условиями — несмотря на одинаковую продолжительность периода залегания снежного покрова (254 дня), средняя многолетняя годовая температура воздуха исследуемого района Аляски составляет $-7,4$ °С [7] против $-3,1$ °С в п. Баренцбург.

На рис. 4 приведена динамика величин испарения с поверхности снега, интенсивность которой определялась по приведенным методам. Значительное увеличение суточных величин испарения обусловлено временными изменениями температуры приземного слоя атмосферы. Так, с 18.04 по 22.04.2024 г. наблюдалось потепление от -10 до $1,7$ °С. Оно вызвало увеличение испарения до 2,0–2,5 мм/сут. Аналогичное увеличение температуры от $-4,0$ до $0,3$ °С, увеличило суточные потери влаги до 1,5–2,0 мм.

Одним из факторов, способствующих увеличению количества испарившейся влаги, является продолжительность предвесеннего периода и запас воды в снеге. В 2024 г. продолжительность этого периода достигла 43 суток, а запас воды в снеге — 360 мм. Из-за конструктивных недостатков испарителя ГГИ-500-6 и высокой интенсивности таяния снега измерение испарения становится невозможным.

Сезонная динамика испарения, рассчитанная тремя методами, имеет определенную корреляцию суточных величин. На рис. 5 показана взаимная корреляция между данными полумпирического метода и расчетом по модели. Коэффициент корреляции равен 0,776.

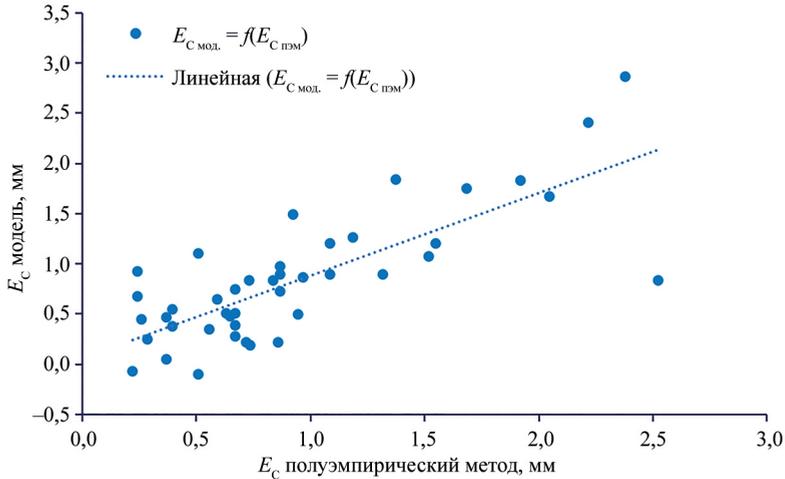


Рис. 5. Взаимная корреляция величин испарения со снежного покрова, рассчитанных полуэмпирическим методом и по модели $E_c = f(D, U)$

Fig. 5. Correlation of the values of snow sublimation calculated by a semi-empirical method and according to the model $E_c = f(D, U)$

Аналогичная взаимная корреляция между полуэмпирическим методом и расчетом испарения по П.П. Кузьмину значительно ниже ($r = 0,466$).

Выводы

Путем проведения инструментальных наблюдений определена интенсивность испарения со снежного покрова в условиях Арктики (о. Шпицберген, п. Баренцбург, 2021–2024 гг.). Из 118 суток наблюдений только 28,8 % были двухсрочными и не имели каких-либо ограничений. На основе наблюдений сформирована опорная база двухсрочных (ночные и дневные) данных, состоящая из 35 членов ряда, в период определения которых отсутствовали осадки. Анализ выделенного массива показал, что среднесуточная величина испарения с поверхности снега в предвесенний период равна 0,60 мм; в дневное время 0,43 мм и в ночное время — 0,17 мм, что составляет 40 % от дневного. Установлено, что между дневным испарением и испарением за сутки существует зависимость с коэффициентом корреляции 0,924. Взаимная корреляция испарения за ночной и дневной периоды снижается до уровня $r = 0,742$. Зависимости выражены уравнениями, которые используются для восстановления пропусков в наблюдениях. Методом линейного регрессионного анализа построена таблица, позволяющая оценить воздействия метеорологических факторов на процесс испарения. Ее анализ показал, что наибольшее влияние на процесс испарения оказывают скорость ветра ($r = 0,822$), дефицит влажности ($r = 0,670$) и температура воздуха ($r = 0,724$). При выборе оптимальной модели испарения применялись различные сочетания независимых переменных. Из ряда моделей была отобрана одна, чья совокупность характеристик была наиболее качественной, — $E_c = f(D, U)$. Коэффициент корреляции суточных сумм испарения от скорости ветра и дефицита влажности при применении этой модели равен 0,875. Ликвидацию пропусков в наблюдениях и расчет суточных величин испарения предлагается осуществлять: 1) полуэмпирическим методом, который основан на использовании соотношений между ночной,

дневной и суммарной суточной величинами испарения; 2) применением модели $E_c = f(D, U)$. При сравнении результатов расчета использован метод П.П. Кузьмина. Средняя величина испарившейся влаги, определенная этими методами, равна 35,6 мм и изменяется в пределах от 30,9 (по Кузьмину) до 40,2 мм (полуэмпирический метод). Рассмотрены достоинства и недостатки методов и возможности их применения при наличии и отсутствии наблюдений. Установлена высокая степень корреляции суточных величин испарения, рассчитанных тремя рассматриваемыми методами. Взаимная корреляция суточных величин по полуэмпирическому методу и расчетом по модели равна 0,776.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. Регистрационный номер НИТР АААА-А20-120041590009-7.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность руководству и сотрудникам Российской научной арктической экспедиции на арх. Шпицберген, ее зимовочным и сезонным составам, а также сотрудникам лаборатории экспериментальной климатологии Арктики отдела взаимодействия океана и атмосферы за предоставленные данные о солнечной радиации.

Competing interests. The authors have no conflict of interest to declare.

Financing. The research was funded within project 5.1.4 of Roshydromet RTW Plan 2020–2024. RTW registration number АААА-А20-120041590009-7.

Acknowledgments. The team of authors expresses gratitude to the management and staff of the Russian Scientific Arctic Expedition in the archipelago of Spitsbergen, as well as its wintering and seasonal teams, and to the employees of the Laboratory of Experimental Climatology of the Arctic in the Department of Ocean-Atmosphere Interaction for the data they provided on solar radiation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Постников А.Н. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России. *Ученые записки РГГМУ*. 2016;42:55–63.
Postnikov A.N. Evaporation from the surface of snow cover during the period of its occurrence on the territory of Russia. *Scientific notes of RSHU*. 2016;42:55–63. (In. Russ.)
2. Liston G.E., Sturm M. The role of winter sublimation in the Arctic moisture budget. *Nordic Hydrology*. 2004;35:4–5:325–334. <https://doi.org/10.2166/nh.2004.0024>
3. Strasser U., Bernhardt M., Weber M., Liston G.E., Mauser W. Is snow sublimation important in the alpine water balance? *Cryosphere*. 2008;2:53–66. <https://doi.org/10.5194/tc-2-53-2008>
4. Stigter E.E., Litt M., Steiner J.F., Bonekamp P.N.J., Shea J.M., Bierkens M.F.P., Immerzeel W.W. The importance of snow sublimation on a Himalayan glacier. *Frontiers in Earth Science*. 2018;6:1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00108>
5. Екайкин А.А., Заровчатский В.Н., Липенков В.Я. Измерение скорости сублимации снега на станции Восток, Центральная Антарктида. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015;4:20–25.
Ekajkin A.A., Zarovchatskij V.N., Lipenkov V.Ya. Measuring the rate of snow sublimation at Vostok Station, Central Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki=Arctic and Antarctic Research*. 2015;4:20–25. (In. Russ.)
6. Palm S.P., Kayetha V., Yang Y., Pauly R. Blowing snow sublimation and transport over Antarctica from 11 years of CALIPSO observations. *The Cryosphere*. 2017;11:2555–2569. <https://doi.org/10.5194/tc-2017-45>
7. Spehlmann K., Euskirchen E., Stuefer S. Sublimation measurements of tundra and taiga snowpack in Alaska. *The Cryosphere Discussions*. 2023. <https://doi.org/10.5194/tc-2023-153> [preprint]

8. Lundquist J.D., Vano J., Gutmann E., Hogan D., Schwat E., Haugeneder M., Mateo E., Oncley S., Roden C., Osenga E., Carver L. Sublimation of snow. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2024;105:E975–E990. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0191.1>
9. Журавин С.А. *Исследование процессов влагооборота на воднобалансовых станциях в России*. СПб.: ООО «РИАЛ»; 2022. 224 с.
Zhuravin S. A. *Study of water at the water balance stations in Russia*. St. Petersburg: RIAL ltd; 2022. 224 p. (In. Russ.)
10. Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Восстановление ряда приземной температуры воздуха на Российской станции в поселке «Баренцбург» (Шпицберген). *Российская Арктика*. 2020;9:30–40. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12093>
Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D. Reconstruction of a series of surface air temperatures at the Russian station in the settlement of Barentsburg (Spitsbergen). *Russian Arctic*. 2020;9:30–40. (In. Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12093>
11. Калюжный И.Л., Скороспехова Т.В. Оценка современного состояния методов измерения и расчета испарения со снега. *Труды ГГО*. 2022;605:109–137.
Kalyuzhny I.L., Skorospekhova T.V. Assessment of the modern state of methods for measurement and calculation of evaporation value from the snow cover surface. *Proceedings of SGO*. 2022;605:109–137. (In. Russ.)
12. Mandal A., Angchuk T., Azam M. F., Ramanathan A., Wagnon P., Soheb M., Singh C. An 11-year record of wintertime snow-surface energy balance and sublimation at 4863 m a. s. l. on the Chhota Shigri Glacier moraine (western Himalaya, India). *The Cryosphere*. 2022;16:3775–3799. <https://doi.org/10.5194/tc-16-3775-2022>
13. Liston G.E., Elder K. A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet). *Journal of Hydrometeorology*. 2006;7:217–234. <https://doi.org/10.1175/JHM486.1>
14. Кузьмин П.П. К методике исследования и расчета испарения с поверхности снежного покрова. *Труды ГГИ*. 1953;241(95):34–52.
Kuzmin P.P. On the methodology of studying and calculating evaporation from the surface of snow cover. *Proceedings of the State Hydrological Institute*. 1953;241(95):34–52. (In. Russ.)