

Л.М. Псаломщикова, Е.М. Акентьева

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ СЛОЯ СВЕЖЕВЫПАВШЕГО СНЕГА ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ОСАДКОМЕРОВ ОТТ PLUVIO² 200 И МЕТЕОСТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И БЛИЖАЙШИХ ПРИГОРОДОВ

1. Область применения

Методика разработана для определения высоты свежесвыпавшего снега по данным автоматизированной информационной сети учета атмосферных осадков (АИС «Осадки») Санкт-Петербурга, в которую входят 34 пункта, оборудованные автоматическими осадкомерами ОТТ Pluvio² 200, метеостанции и посты, расположенные на территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов.

Измерение высоты (толщины) слоя свежесвыпавшего снега не входит в программу стандартных метеорологических наблюдений, однако высокая востребованность этих данных и невозможность ее качественного удовлетворения характерны для всех регионов России, что неоднократно отмечалось специалистами Гидрометслужбы Российской Федерации на совещаниях по обеспечению потребителей специализированной гидрометеорологической информацией.

В первую очередь в информации о свежесвыпавшем снеге заинтересованы организации, занимающиеся обеспечением дорожного движения, транспортные компании, коммунальные службы, специалисты ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», обеспечивающие уборку и доставку снега на снегоприемные и снегоплавильные пункты с целью его утилизации.

2. Общие положения

На государственной наблюдательной сети один раз в сутки производятся наблюдения только за высотой снежного покрова [5], которая определяется на основании измерений расстояния от поверхности земли до поверхности снежного покрова с помощью стационарной снегомерной рейки. По этим данным можно оценить изменение высоты снежного покрова за прошедшие сутки (за счет снегопада или других осадков, метелевого переноса, таяния, уплотнения, испарения).

В Канаде и США измерения высоты свежеснегоснежного покрова производятся на снегомерных площадках или с помощью снегомерных досок, поверхность которых расчищается от старого снега до начала снегопада. В качестве снегомерной доски используется фанерная доска или пластина из легкого металла размером не менее 40×40 см, поверхность которой окрашивается белой краской или обтягивается белой фланелью [7].

Аналогичные наблюдения по просьбе заинтересованных организаций были организованы в 1965 году в Ленинграде [4]. Измерение высоты слоя свежеснегоснежного покрова до 2004 г. производилось два раза в сутки (в 09 и 21 ч МСК), затем каждые три часа. В настоящее время наблюдения за высотой свежеснегоснежного покрова ведутся на семи метеостанциях и постах Санкт-Петербурга.

3. Способы расчета высоты слоя свежеснегоснежного покрова

При отсутствии наблюдений высота слоя свежеснегоснежного покрова может быть косвенно определена по его плотности. Для пересчета плотности снега в его высоту используется зависимость [3]:

$$H_{s,f} = \frac{p_s \cdot \rho_w}{\rho_{s,f}} ; \quad (1)$$

где $H_{s,f}$ – высота свежеснегоснежного покрова, см; p_s – сумма осадков, мм; ρ_w – плотность воды (1000 кг/м³); $\rho_{s,f}$ – плотность свежеснегоснежного покрова, кг/м³.

Плотность свежеснегоснежного покрова зависит от метеорологических условий при выпадении снега (приземных температуры воздуха и скорости ветра), а также от структуры и размера снежных кристаллов, формирование которых определяется метеорологическими условиями на высоте 2–5 км.

Различные способы определения плотности свежевыпавшего снега в зависимости от температуры приземного воздуха довольно подробно рассмотрены в [1, 3, 8]. В частности, в [3] приводятся следующие алгоритмы определения плотности свежевыпавшего снега, используемые в атмосферном моделировании:

– алгоритм, базирующийся на модели подстилающей поверхности CLASS

$$\begin{aligned} \rho_{s,f} &= 67,92 + 51,25 e^{\frac{T_\alpha}{2,59}}, \quad T_\alpha \leq 0^\circ\text{C}; \\ \rho_{s,f} &= \min(200; 119,2 + 20T_\alpha), \quad T_\alpha > 0^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2)$$

где T_α – температура воздуха, °C;

– алгоритм определения плотности свежевыпавшего снега, используемый в блоке описания процессов на подстилающей поверхности TERRA (блок модели COSMO):

$$\rho_{snow, fresh} = \rho_{s,f, min} + (\rho_{s,f, max} - \rho_{s,f, min}) \frac{T_{low} - T_{min}}{T_0 - T_{min}}, \quad (3)$$

где:

$$\rho_{s,f, min} = 50 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{s,f, max} = 150 \text{ кг/м}^3;$$

точка заморозания $T_0 = 273,16 \text{ К}$;

$$T_{min} = 258,15 \text{ К};$$

T_{low} – температура самого нижнего модельного уровня атмосферы.

Данные алгоритмы были использованы при анализе исходных данных и тестирования разработанной методики.

4. Цель разработки методики

Целью разработки методики является разработка способа преобразования данных о количестве твердых осадков, измеренных осадкомером и выраженных в толщине водного слоя (мм), в толщину (высоту) слоя свежевыпавшего снега (см).

Для этого была исследована зависимость между этими параметрами при различной температуре воздуха во время снегопадов.

В результате были получены коэффициенты перехода от количества выпавших твердых осадков в мм к соответствующей высоте слоя снега в см.

5. Анализ исходных данных, использованных при разработке методики

Основой для выполнения данной работы явились параллельные ряды полусуточных (в 06 и 18 ч ВСВ) значений параметров на метеостанции Санкт-Петербург за период с 1985 по 2014 г. по следующим характеристикам:

- высота свежевыпавшего снега, см;
- количество соответствующих осадков, измеренных осадкомером Третьякова, выраженных в водном эквиваленте, мм;
- средняя приземная температура воздуха в период выпадения осадков, °С;
- средняя скорость ветра в период выпадения осадков, м/с;
- время выпадения осадков и их вид.

Методика разработана только для случаев выпадения атмосферных осадков в виде снега и мокрого снега. Если хотя бы кратковременно в период выпадения осадков отмечались дождь или морось, данные из выборки исключались.

Высота слоя свежевыпавшего снега ($H_{\text{см}}$) на метеостанции Санкт-Петербург измеряется на специальных планшетах, установленных на метеоплощадке, при помощи градуированной линейки. После снятия показаний снег с планшета счищается.

Количество твердых осадков ($R_{\text{мм}}$) измеряется с помощью осадкомера Третьякова. Оно соответствует толщине слоя воды в мерном стакане, образовавшегося после растапливания попавшего во время снегопада в ведро осадкомера снега.

Для анализа было отобрано 2397 пар полусуточных значений высоты слоя свежевыпавшего снега (см) и соответствующего количества осадков (мм).

Наиболее тщательному контролю подвергались данные о высоте свежевыпавшего снега через его плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Из исходного массива также были исключены случаи, когда расчетные значения плотности свежевыпавшего снега оказались менее 30 или 300 $\text{кг}/\text{м}^3$ и более. Выбор таких граничных условий основывался на анализе большого числа исследований в этой области [2, 3, 8].

Откорректированный массив исходных данных о высоте свежевыпавшего снега был разбит по одноградусным градациям температуры воздуха и для каждой градации рассчитана средняя плотность

свежевыпавшего снега по данным наблюдений в Санкт-Петербурге и по эмпирической формуле (2). Результаты сравнения зависимостей плотностей от приземной температуры воздуха во время выпадения снега представлены на рис. 1.

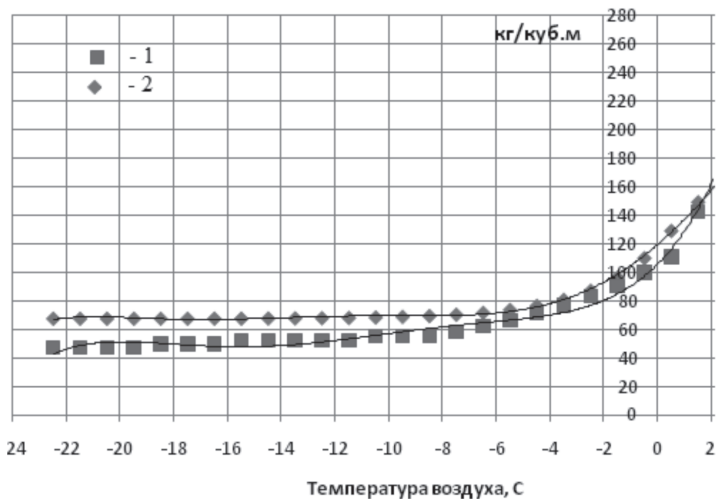


Рис. 1. Плотность свежевыпавшего снега, рассчитанная по данным наблюдений на метеостанции Санкт-Петербург (1) и по эмпирической формуле (2) [3] при различной средней температуре воздуха во время снегопада.

Полученная зависимость дает реальные значения плотности снега в интервале от 50 до 160 кг/м³, однако они систематически меньше значений, рассчитанных согласно параметризациям (2) в диапазоне температур ниже –10 °С.

Влияние ветра на плотность снега не рассматривалось, так как оно может быть значимо только при средних скоростях ветра во время снегопадов более 5 м/с [1, 8]. В использованном массиве исходных данных по Санкт-Петербургу на такие случаи приходится только 6,5 %.

6. Методика определения высоты свежевыпавшего снега

6.1. Определение коэффициентов перехода от количества твердых осадков (мм) к высоте слоя снега (см)

По данным откорректированных рядов наблюдений о высоте свежевыпавшего снега ($H_{\text{см}}$) и количестве твердых осадков, измеренных

осадкомером Третьякова (R_{MM}), для каждого случая выпадения снега рассчитывалось отношение (H_{CM}/R_{MM}). Затем все отношения (H_{CM}/R_{MM}) группировались в зависимости от средней за снегопад приземной температуры воздуха и для каждой градации температуры рассчитывалось среднее значение (H_{CM}/R_{MM}), среднее квадратическое отклонение и средняя квадратическая ошибка среднего значения (табл. 1).

Как видно из таблицы, в интервале температур от 1,5 до $-14,0^\circ\text{C}$ ошибка среднего значения (H_{CM}/R_{MM}) не превышает 5%. При температурах выше $+2,0^\circ\text{C}$ и ниже $-16,0^\circ\text{C}$, когда резко уменьшается число снегопадов, ошибка возрастает в два-три раза.

Наиболее четко зависимость отношения (H_{CM}/R_{MM}) от температуры проявляется в интервале от $+1,5$ до $-12,0^\circ\text{C}$. При этих условиях в регионе Санкт-Петербурга и пригородов отмечается более 90% снегопадов. При более низких температурах отношение (H_{CM}/R_{MM}) остается практически постоянным.

В результате проведенного анализа было принято решение принять средние значения отношения (H_{CM}/R_{MM}) в качестве коэффициента перехода от количества осадков (R_{MM}) к высоте слоя свежеснегоснега (H_{CM}) с точностью, указанной в табл. 1:

$$K_{cp.} = H_{CM}/R_{MM} . \quad (4)$$

Зависимость значений K_{cp} от средней за снегопад приземной температуры воздуха может быть выражена следующим уравнением:

$$K_{cp} = -0,002 t^2 - 0,113t + 0,937. \quad (5)$$

Графически эта зависимость представлена на рис. 2.

6.2. Алгоритм расчета высоты свежеснегоснега

При оперативной оценке высоты свежеснегоснега потребителю необходимо определить:

- среднюю за период выпадения твердых осадков (снег, мокрый снег) температуру воздуха (T_{cp} $^\circ\text{C}$);

- сумму твердых осадков, выраженную в толщине водного слоя ($R_{ТВ.ОС.ММ}$);

- средний коэффициент (K_{cp}) перехода от водного эквивалента твердых осадков в мм к высоте слоя свежеснегоснега ($H_{расч}$) в см по табл. 1 или по формуле (5);

Таблица 1

Статистические характеристики отношения ($H_{\text{сн}}/R_{\text{мм}}$)
при разной температуре воздуха, осредненной за период снеготаяла

Температура, °С	$\leq -20,0$	$-20,0 -$ $-19,0$	$-19,0 -$ $-18,0$	$-18,0 -$ $-17,0$	$-17,0 -$ $-16,0$	$-16,0 -$ $-15,0$	$-15,0 -$ $-14,0$	$-14,0 -$ $-13,0$
Число случаев	9	5	8	12	10	28	29	34
$H_{\text{сн}}/R_{\text{мм}}$	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9
σ	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5
$(\sigma/\Delta n)$	0,27	0,31	0,20	0,17	0,19	0,14	0,12	0,09
$(\sigma/\Delta n)$ %	13	15	10	9	10	7	6	5
Температура, °С	$-13,0 -$ $-12,0$	$-12,0 -$ $-11,0$	$-11,0 -$ $-10,0$	$-10,0 -$ $-9,0$	$-9,0 -$ $-8,0$	$-8,0 -$ $-7,0$	$-7,0 -$ $-6,0$	$-6,0 -$ $-5,0$
Число случаев	36	48	71	91	76	97	103	148
$H_{\text{сн}}/R_{\text{мм}}$	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
σ	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
$(\sigma/\Delta n)$	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04
$(\sigma/\Delta n)$ %	5	4	4	4	4	4	4	3
Температура, °С	$-5,0 -$ $-4,0$	$-4,0 -$ $-3,0$	$-3,0 -$ $-2,0$	$-2,0 -$ $-1,0$	$-1,0 -$ $0,0$	$0,0 -$ $1,0$	$1,0 -$ $2,0$	$\geq 2,0$
Число случаев	143	184	186	200	232	224	52	7
$H_{\text{сн}}/R_{\text{мм}}$	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6
σ	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$(\sigma/\Delta n)$	0,04	0,03	0,02	0,18	0,01	0,01	0,02	0,08
$(\sigma/\Delta n)$ %	3	2	2	2	1	1	3	13

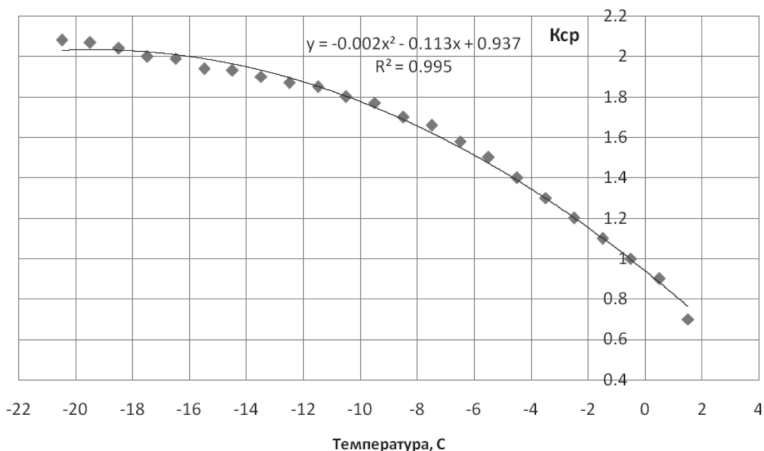


Рис. 2. Зависимость величины коэффициента $K_{ср} = H_{ср}/R_{мм}$ от средней температуры воздуха в период выпадения снега.

– выполнить расчет по формуле:

$$H_{расч, см} = R_{тв.ос, мм} \cdot K_{ср} . \quad (6)$$

Все характеристики рассчитываются за периоды выпадения твердых осадков внутри полусуточных интервалов: ночь – с 18 ч до 06 ч, или день – с 06 ч до 18 ч ВСВ.

7. Тестирование методики определения высоты слоя свежеснегавшего снега по данным о количестве осадков, измеренных с помощью автоматических осадкомеров Pluvio² 200

7.1. Исходные данные для тестирования методики

Для тестирования разработанной методики использованы данные городской метеостанции Санкт-Петербург и двух метеостанций, расположенных в пригородах (Ломоносов и Кронштадт), входящих в АИС «Осадки». На этих метеостанциях ведутся измерения осадков автоматическим осадкомером Pluvio² 200, осадкомером Третьякова, а также измеряется высота свежеснегавшего снега и приземная температура.

Для тестирования методики использованы данные только за январь и февраль 2015 и 2016 гг., поскольку в остальные месяцы

осенне-зимнего сезона из-за аномально теплой погоды наблюдались лишь единичные случаи выпадения снега и мокрого снега.

7.2. Сравнение расчетной и фактической высоты свежеснегавпавшего снега

Точность расчетов высоты слоя свежеснегавпавшего снега с использованием разработанной методики оценивалась по разности между рассчитанной и фактической высотой слоя свежеснегавпавшего снега $\Delta = (H_{\text{расч}} - H_{\text{факт}})$ при конкретных снегопадах за полусуточные интервалы времени.

Как видно из табл. 2, рассчитанная высота свежеснегавпавшего снега хорошо согласуется с фактически наблюдаемой: средняя абсолютная величина отклонения на всех трех станциях не превышает 0,8 см, средняя квадратическая ошибка находится в интервале 0,8–1,1.

Таблица 2

Разности между высотой свежеснегавпавшего снега, фактической и рассчитанной различными методами

Характеристики	Станции	$\Delta (H_{\text{расч}} - H_{\text{факт}})$, см			
		Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
Среднее отклонение, см	СПб	-0,3	-0,7	-0,6	-1,0
	Кронштадт	-0,1	-0,6	-0,4	-0,8
	Ломоносов	-0,2	-0,6	-0,5	-1,0
Среднее абсолютное отклонение, см	СПб	0,8	1,0	0,8	1,12
	Кронштадт	0,6	0,8	0,7	0,9
	Ломоносов	0,7	0,9	0,8	1,12
Максимальное абсолютное отклонение, см	СПб	3,3	5,4	3,5	5,5
	Кронштадт	2,1	2,9	2,1	3,3
	Ломоносов	2,9	3,2	3,4	4,8
Среднее квадратическое отклонение	СПб	1,11	1,38	1,15	1,56
	Кронштадт	0,83	1,07	0,86	1,19
	Ломоносов	1,01	1,23	1,16	1,62

Важно отметить, что в предложенном методе косвенного определения высоты свежеснегавпавшего снега не прослеживается систематической ошибки. Это подтверждается разными знаками разностей между рассчитанными и фактическими значениями (рис. 3).

Кроме рассчитанных по разработанной методике ГГО значений высоты снега (Δ_1) были произведены дополнительные расчеты по независимым алгоритмам, не связанным с измерениями высоты снега: с использованием постоянной плотности снега 100 кг/м^3 (Δ_2), формуле (2) алгоритма CLASS (Δ_3), формуле (3) в блоке TERRA модели COSMO (Δ_4) (табл. 2).

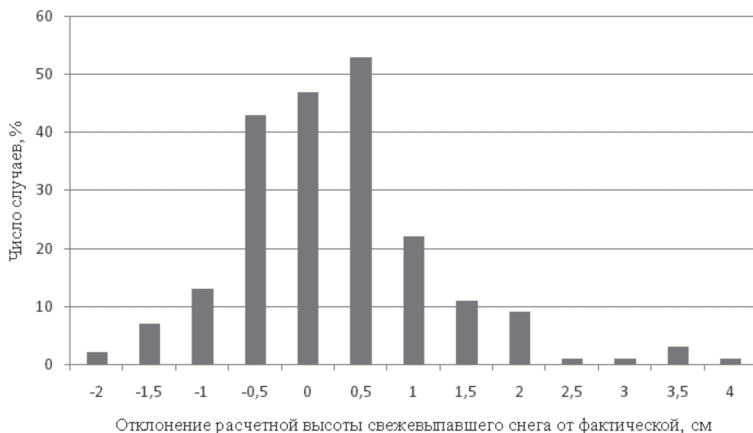


Рис. 3. Повторяемость (%) отклонений расчетной высоты свежеснеговоспадающего снега от фактической высоты.

Как видно из табл. 2, рассчитанная по методике ГГО (Δ_1) высота слоя свежеснеговоспадающего снега ближе к измеренным значениям, чем по другим алгоритмам. Это наглядно видно по средним, абсолютным и средним квадратическим отклонениям.

Следует отметить некоторое занижение расчетной высоты снега, как по разработанной методике, так и по другим алгоритмам (отрицательные значения средних отклонений), но по методике ГГО занижение существенно меньше.

Достоинством методики является простота в использовании и возможность получать не только фактические, но и прогностические значения высоты слоя свежеснеговоспадающего снега. Для прогноза высоты слоя свежеснеговоспадающего снега используются данные модельных расчетов количества осадков (их рассчитывают практически все модели) и средняя за снегопад температура воздуха, которую синоптик прогнозирует с учетом синоптической ситуации.

К недостаткам методики можно отнести увеличение погрешности определения высоты слоя свежеснегавпавшего снега при понижении температуры воздуха ниже -13°C , обусловленное уменьшением количества снегопадов при этих температурах.

ЦМКП Росгидромета рекомендовала:

– внедрить «Методику определения высоты слоя свежеснегавпавшего снега по данным о количестве осадков (осадкомеры ОТТ Pluvio² 200, осадкомеры Третьякова) и приземной температуре воздуха в оперативную работу ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и ФГБУ «Северо-Западное УГМС» для гидрометеорологического обеспечения потребителей Санкт-Петербурга и западной части Ленинградской области, заинтересованных в данной информации;

– авторам продолжить работу по совершенствованию методики в области статистической обработки высоты свежеснегавпавшего снега и расширения области применения данного регионального метода за счет включения в выборку данных наблюдений для восточных областей Ленинградской области, характеризующихся другими режимами изменения температуры воздуха и скорости ветра в период выпадения снега.

Список литературы

1. *Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Гаврилова С.Ю.* Современные методы коррективы измеренных осадков и результаты их применения в полярных регионах России и Северной Америки // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 4. – С. 21–44.
2. *Войтковский К.Ф.* Механические свойства снега. – М.: Наука, 1977. – 126 с.
3. *Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А.* Алгоритм расчета высоты свежеснегавпавшего снега, предназначенный для постпроцессинга систем атмосферного моделирования (на примере COSMO) // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 350. – С. 195–212.
4. *Климат Ленинграда* / Под ред. Ц.А. Швер. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 254 с.
5. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам.* Выпуск 3. Часть 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 300 с.
6. РД 52.04.839-2016. Методические указания по производству и обработке данных наблюдений за атмосферными осадками на автоматических метеорологических постах. – 27 с.
7. *Снег: Справочник* / Под ред. Д. М. Грея, Д.Х. Мэйла; Перевод с англ. – Л. Гидрометеиздат, 1986. – 751 с.
8. *Meister R.* Density of new snow and its dependence on air temperature and wind // Proceedings of Workshop on the Correction of Precipitation Measurements Zurcher Geographische Schriften. Heft 23. – 1986. – P. 73–80.