

А.Н. Постников

**ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА
ЗА ПЕРИОД ЕГО ЗАЛЕГАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

A.N. Postnikov

**EVAPORATION FROM THE SURFACE OF SNOW COVER
FOR THE PERIOD OF ITS OCCURRENCE ON THE TERRITORY OF RUSSIA**

После анализа более 2500 серий суточных данных наблюдений за испарением со снега получена формула для расчета испарения за месячные интервалы времени. На основании расчетов по этой формуле построена карта испарения с поверхности снежного покрова за период его залегания для территории России. Для этой же территории построена карта продолжительности залегания снежного покрова.

Ключевые слова: испарение с поверхности снега, карта испарения, территория России.

A new formula for calculation of evaporation from the snow at monthly intervals is obtained after analyzing over 2500 series of daily observations for evaporation from the snow. Evaporation map from the surface of the snow cover for the period of its occurrence for the territory of Russia is made on the basis of calculations under this formula. A map of duration of snow occurrence is made for the same territory.

Key words: evaporation from the snow surface, evaporation map, territory of Russia.

Обширная территория России ежегодно покрывается снежным покровом, продолжительность залегания которого, как будет показано далее, колеблется от 70–80 суток (Северный Кавказ) до 270–280 суток (острова Новая Земля и Северная Земля). В течение этого времени на поверхности снега происходят процессы конденсации и испарения. Еще в 1871 г. А.И. Воейков выдвинул положение о том, что так как температура поверхности снега выше точки росы нижнего слоя воздуха, то испарение с поверхности снега должно превышать конденсацию [2]. Это положение в дальнейшем было полностью подтверждено результатами наблюдений. В нашей стране наблюдения за испарением со снега до 1963 г. носили эпизодический характер, а с 1963 г. стали проводиться по единой программе с применением стандартных приборов и методов наблюдений на выборочной сети гидрометеостанций, расположенных в различных природных зонах [6]. Информация об испарении со снега используется при проведении воднобалансовых исследований и расчетов, она позволяет полнее представить структуру внутригодового испарения с поверхности некоторого речного бассейна или конкретной территории.

Целью настоящей работы является построение карты среднего годового испарения с поверхности снежного покрова расчетным путем за период его залегания (ПЗ) на территории России до заметных изменений климата примерно за период 1936–1960 гг., данные за который приводятся в Справочниках по климату [13]. Как известно, начиная

с 70-х гг. прошлого столетия для большей части России отмечается ярко выраженное потепление, скорость которого особенно значительна для северных районов страны [7]. Очевидно, что следующей задачей должно быть уточнение оценок испарения за период интенсивного потепления климата.

К настоящему времени известны две карты испарения с поверхности снежного покрова, относящиеся к территории нашей страны — карта А.М. Алпатьева (1963 г.), построенная для Европейской территории СССР [1], и карта В.И. Кузнецова (1964 г.) — для всей территории СССР [3], построенные по измеренным значениям испарения со снега. По мнению специалистов, первая из них дает завышенные, а вторая — заниженные значения испарения. Пользоваться измеренными значениями испарения для построения карты не представлялось возможным, так как наблюдения за ним проводятся по малому количеству пунктов на огромной территории России. Поэтому расчетный путь построения карт испарения предпочтительнее. По-видимому, единственная карта испарения по климатическим данным была построена в работе [12] для Европейской территории бывшего Советского Союза. Однако ее недостаток в том, что она относится к периоду ноябрь–март, в который могут входить периоды времени без снега.

В данной работе картируются рассчитанные значения испарения только со снега с использованием дат установления и схода снежного покрова, но по средним многолетним месячным значениям метеоэлементов из Справочника по климату [13], причем в крайние зимние месяцы исключалось число дней без снега. Таким образом, для наших целей необходимо было располагать формулой, которая давала бы более или менее надежные результаты именно для месячных интервалов времени. Приведем известные формулы П.П. Кузьмина [6, 11]:

$$E = (0,18 + 0,10U)(e_0 - e) \text{ мм/сут.}, \quad (1)$$

$$E = (0,24 + 0,05U)d \text{ мм/сут.}, \quad (2)$$

где E — испарение со снега; U — скорость ветра на высоте флюгера, м/с; e_0 — парциальное давление насыщенного водяного пара в приземном слое воздуха, определенное по температуре поверхности снега, гПа; e — парциальное давление водяного пара в воздухе на высоте 2 м, гПа; d — дефицит влажности воздуха (гПа).

Формулы (1) и (2) предназначены для определения испарения за сутки, поэтому если при расчете среднемесячных суточных величин E в качестве U , e_0 , e , d в эти формулы подставлять их средние значения за месяц, то при таком подходе не будут учитываться значения корреляционных моментов между U и $(e_0 - e)$ в первой и между U и d — во второй формулах, которые могут возникнуть при корректном применении формул (1) и (2) для расчета средних месячных величин испарения. По этой причине использование приведенных формул для нашей задачи представлялось не совсем возможным.

При определении испарения со снега за месяц и более продолжительные периоды рекомендуется применять упрощенную формулу, автором которой является также Кузьмин:

$$E = 0,37nd \text{ мм}, \quad (3)$$

где n — число суток в расчетном промежутке времени.

Случайные погрешности вычисления по формулам (1)–(3) месячных и сезонных значений испарения с поверхности снежного покрова за отдельные годы составляют около 30 % [11]. В проекте более раннего нормативного документа Указания по расчету испарения с поверхности суши [14] рекомендовалось применять для расчетов за промежутки времени более месяца формулы

$$E = 0,5n(e_0 - e) \text{ мм}; \quad (4)$$

$$E = 0,34nd \text{ мм}. \quad (5)$$

При этом указывалось, что эти формулы распространяются на территорию европейской части СССР, Северного Казахстана и Западной Сибири. Значения коэффициентов (0,5 и 0,34) являются некоторыми средними, на самом деле они варьируют по площади указанной территории в пределах $\pm 25\%$. Нам нужна была формула, позволяющая рассчитывать средние месячные значения испарения по среднемесячным значениям тех метеоэлементов, от которых оно зависит, по всей территории России. Для решения этой задачи были использованы суточные данные наблюдений за испарением со снега и сопутствующими метеоэлементами по 23 станциям, расположенным на территории бывшего Советского Союза [5] и указанным в табл. 1.

Таблица 1

Список станций, материалы наблюдений которых приведены в [5]

Станция	Страна, область, край	Станция	Страна, область, край
Прибалтийская	Латвия	Шортанды	Казахстан
Пулозеро	Мурманская обл.	Исиль-Куль	Омская обл.
Хибины	Мурманская обл.	Омск	—
Болхов	Орловская обл.	Тара	Омская обл.
Подмосковная	Московская обл.	Тулун	Иркутская обл.
Нижедевицк	Воронежская обл.	Хомутово	Иркутская обл.
Каменная Степь	Воронежская обл.	Качуг	Иркутская обл.
Ройка	Нижегородская обл.	Чита	—
Прикумск	Ставропольский край	Покровск	Республика Саха (Якутия)
Уральск	Казахстан	Хабаровск	—
Кокшетау	Казахстан	Сосновка	Камчатка
Чаглы	Казахстан	—	—

Состав данных, приведенных в [5]: E — испарение, мм/сут.; T_v — температура воздуха, °С; e — парциальное давление водяного пара в воздухе на высоте 2 м, гПа;

r — относительная влажность воздуха, %; U — скорость ветра на высоте флюгера, м/с; d — дефицит влажности воздуха, гПа; T_c — температура поверхности снега, °С; e_0 — парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре поверхности снега. Следует отметить, что приводимые в [5] значения d и e_0 получены не по средним за сутки величинам T_b и e , а как средние по 8 срокам наблюдений за сутки, то есть корректным способом.

Серии суточных данных страница за страницей заносились нами по порядку в общую таблицу. Суммарное количество таких серий оказалось равно 2544. В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции, полученные по этим данным, между E и всеми остальными переменными, перечисленными выше.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции

	T_b	e	r	U	d	T_c	e_0
E	0,48	0,31	-0,39	0,26	0,66	0,46	0,52

Данные табл. 2 показывают, что суточное испарение сильнее всего коррелирует с суточным дефицитом влажности воздуха. Отсюда можно предположить, что и на уровне среднемесячных значений E будет коррелировать с d сильнее, чем с любой другой переменной из табл. 2. Поэтому испарение в расчетной формуле должно зависеть от дефицита влажности воздуха. Ряды величин E и d были разбиты на группы по 30 членов. Для каждой группы были определены средние значения E и d . Всего таких групп образовалось 84. Затем между средними значениями E и d методом наименьших квадратов было получено уравнение связи для расчета суточных величин испарения со снега для среднемесячных условий с коэффициентом корреляции 0,80:

$$E = 0,31d \text{ мм/сут.}, \quad (6)$$

где d — средний за месяц дефицит влажности воздуха. Стандартная погрешность коэффициента регрессии составила 0,02. С помощью формулы (6) и проводились расчеты испарения для построения карты. Для целых месяцев использовалась формула

$$E = 0,31nd \text{ мм}, \quad (7)$$

где n — число суток в месяце. Расчет для частей начального и конечного месяцев ПЗ проводился следующим образом. Считалось, что среднесуточный дефицит влажности воздуха за часть месяца, в которой залегает снежный покров, составляет

$$D = m(d/k) \text{ гПа}, \quad (8)$$

где m — число дней залегания снежного покрова в данном месяце; d — среднее многолетнее значение дефицита влажности воздуха в данном месяце из Справочника по климату; k — число дней в данном месяце.

Затем для ряда пунктов на территории России были собраны данные о средних многолетних датах образования устойчивого снежного покрова и его схода, а также данные по нормам дефицита влажности воздуха за месяцы ПЗ, по которым с помощью формул (7) и (8) рассчитывалось испарение за ПЗ для данного пункта. В общей сложности таких пунктов было 452, из них 105 расположены на европейской территории страны. По результатам проведенных расчетов была построена карта, представленная на рис. 1. Изолинии на ней показывают, что испарение изменяется от 15 мм в районе Северного Кавказа до 45 мм в средней части бассейна р. Енисей. В северной части европейской территории имеется обширная область повышенного испарения (40 мм), вытянутая с запада на восток до Уральских гор. Изолинии с таким же значением прослеживаются также в Восточной Сибири в бассейне Енисея, в западной части бассейна Лены и на Камчатке. На Дальнем Востоке вдоль побережья Охотского моря проходит изолиния со значением 35 мм. Остальные изолинии идут примерно в широтном направлении. Можно сказать, что через всю страну с запада на восток протянулась область повышенного испарения, ограниченная и с севера, и с юга изолиниями 35 мм. При движении от побережья Северного Ледовитого океана на юг испарение возрастает от 15 мм (север полуострова Таймыр, острова Северная Земля и Новосибирские) до 35 мм и более. В южной части страны наблюдается обратная картина. Наименьшие значения здесь наблюдаются на Северном Кавказе (15 мм) и на юге Восточной Сибири (20–25 мм). При движении на север наблюдается увеличение испарения так же, как и в северной части, до 35 мм и более. Исключение составляет Приморский край. Здесь, примерно по его середине проходит изолиния 25 мм, и как на север, так и на юг наблюдается увеличение испарения до 35 мм. Следует отметить повышенное испарение (50 мм) в западной части архипелага Новая Земля (изолиния проведена по результатам расчета для трех станций) по сравнению не только с Северной Землей и Новосибирскими островами, но и по сравнению с участком побережья Северного Ледовитого океана южнее архипелага. Это явление можно объяснить тем, что вдоль западного побережья Новой Земли проходит ветвь теплого Северного Атлантического течения, обуславливающая повышенный температурный фон и более высокий дефицит влажности воздуха. Вместе с тем, на южной оконечности архипелага испарение составляет лишь 25 мм. Проводить здесь изолинии через 5 мм не имело смысла из-за ограниченности данных.

Понятно, что испарение со снега за рассматриваемый период должно зависеть не только от метеоусловий, но и от продолжительности периода. На рис. 2 представлена карта продолжительности ПЗ снежного покрова, построенная на основании среднемноголетних дат установления и схода снежного покрова в 452 пунктах, на которой видно, что как в европейской, так и в азиатской частях страны, ПЗ возрастает с юга на север. Сопоставляя карты на рис. 1 и 2, можно сказать, что в северной части страны в определении испарения метеоусловия «берут верх» над продолжительностью ПЗ, так как в направлении север–юг происходит увеличение испарения при уменьшении ПЗ снежного покрова, но при увеличении дефицита влажности воздуха в этом направлении. В южной части наблюдается обратное явление: в направлении юг–север происходит рост испарения при снижении дефицита в этом направлении, но при увеличении продолжительности ПЗ снежного покрова. Здесь более определяющим фактором является продолжительность ПЗ.

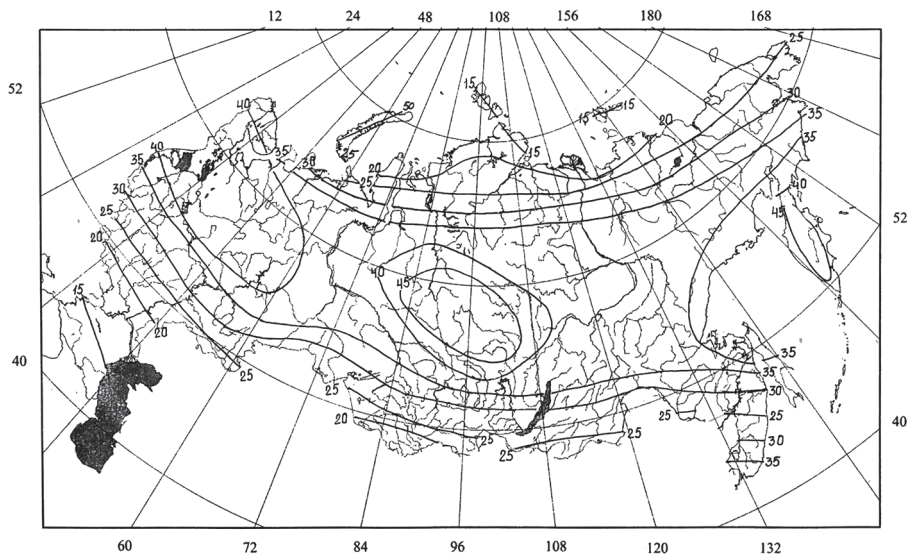


Рис. 1. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России (в мм) за период 1936–1960 гг.

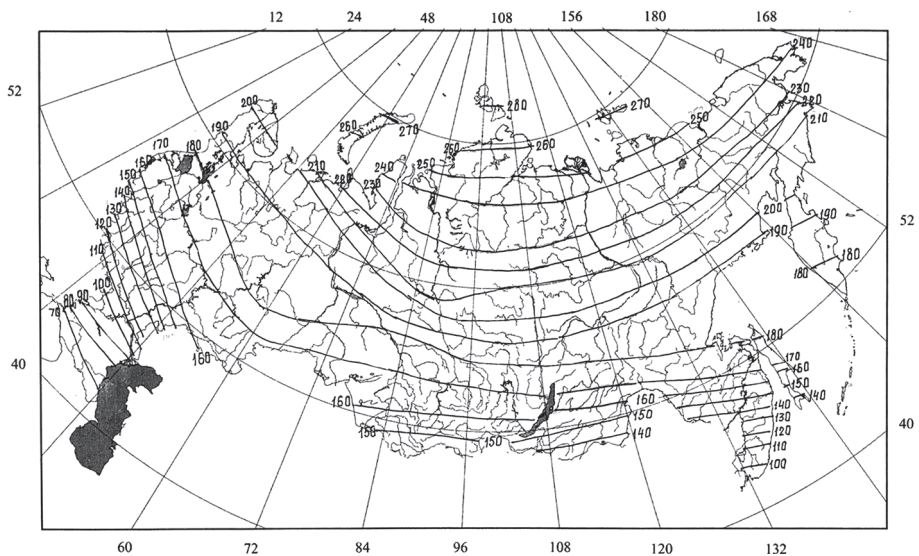


Рис. 2. Средняя продолжительность залегания снежного покрова на территории России (сутки) за период 1936–1960 гг.

Испарение за рассматриваемый период убавляет запасы воды в снеге перед началом весеннего таяния, как это следует из данных рис. 1, на 15–45 мм в зависимости от места расположения пункта на территории России. Интересно оценить уменьшение высоты снега за счет испарения. Запас воды в снеге в точке S метеорологи определяют по формуле

$$S = 10\rho h \text{ мм}, \quad (9)$$

где ρ — плотность снега, г/см³; h — высота снега, см.

Если среднюю плотность снега за ПЗ принять равной 0,25 г/см³, что, по-видимому, будет довольно реальной оценкой, то изменение ΔS , происходящее в результате изменения Δh , можно представить в виде

$$\Delta S = 10\rho\Delta h \text{ мм}. \quad (10)$$

Для нашего случая $\Delta S = E$. Отсюда

$$\Delta h = 0,1E/\rho \text{ см}. \quad (11)$$

При $E = 10$ мм получим $\Delta h = 4$ см. Итак, каждые 10 мм слоя испарения в среднем уменьшают высоту снега на 4 см. Судя по данным карты (рис. 1), можно сказать, что испарение со снега за ПЗ уменьшает высоту снега на территории России от 6 см (Северный Кавказ, острова в Северном Ледовитом океане, исключая Новую Землю) до 16 см в довольно обширной зоне, протянувшуюся с запада на восток через всю страну, и даже до 18 см в средней части бассейна Енисея. Таким образом, можно сказать, что за счет испарения с поверхности снега происходит весьма заметное уменьшение его высоты к началу весеннего таяния.

Возникает вопрос о том, с какой же погрешностью позволяет карта, приведенная на рис. 1, определять испарение с поверхности снега. Попытаемся дать приближенную оценку этой погрешности. Выше говорилось о том, как было получено основное уравнение (7). Затем по этому уравнению были рассчитаны суммарные значения испарения для каждой из 84 групп. Табл. 3 содержит пронумерованные пары месячных величин измеренного и рассчитанного испарения для 84 групп.

Если ПЗ составляет n месяцев, то по данным табл. 3 можно определить $84/n$ целых ПЗ. Затем вычислить значения $E_{и}$ и $E_{р}$ за ПЗ, сравнить их и получить представление о погрешности расчета испарения для каждого ПЗ, например, в виде относительной погрешности (ОП):

$$\text{ОП} = 100|AE_{р} - AE_{и}|/AE_{и}, \quad (12)$$

где $AE_{и}$ и $AE_{р}$ — соответственно суммы измеренного и рассчитанного испарения за ПЗ данной продолжительности. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 3

Измеренные (E_n) и рассчитанные (E_p) значения испарения с поверхности снега за месячные интервалы времени, мм

№ п/п	E_n	E_p	№ п/п	E_n	E_p	№ п/п	E_n	E_p	№ п/п	E_n	E_p
1	0,3	2,6	22	-0,8	2,7	43	10,1	8,8	64	6,3	6,2
2	9,5	7,5	23	6,2	8,7	44	12,4	10,7	65	15,9	12,9
3	8,5	2,2	24	0,8	4,4	45	7,0	6,6	66	3,9	4,8
4	4,1	2,4	25	13,5	10,2	46	14,2	9,8	67	4,6	8,3
5	7,7	4,1	26	4,5	6,8	47	15,0	14,8	68	10,7	8,9
6	4,1	4,8	27	5,6	5,2	48	13,1	16,9	69	1,8	6,1
7	3,8	4,0	28	2,1	2,6	49	2,5	3,2	70	1,6	4,1
8	4,5	3,3	29	17,0	14,5	50	13,5	11,4	71	3,9	5,7
9	3,8	3,3	30	3,1	4,1	51	7,7	3,5	72	2,3	4,9
10	2,7	1,3	31	15,3	11,3	52	5,6	8,7	73	6,1	5,2
11	6,5	5,2	32	2,3	2,9	53	13,0	12,2	74	3,2	5,8
12	-0,02	2,4	33	4,8	4,8	54	3,9	8,0	75	6,4	6,3
13	2,4	3,4	34	3,7	1,8	55	15,4	12,1	76	3,2	3,7
14	3,8	2,7	35	1,1	1,3	56	10,4	12,3	77	6,8	7,2
15	10,6	4,0	36	7,8	5,3	57	2,4	6,1	78	3,3	4,7
16	0,5	1,7	37	8,8	4,0	58	4,1	4,5	79	9,2	4,8
17	3,9	3,1	38	4,1	2,6	59	2,2	4,8	80	1,9	2,9
18	3,6	2,2	39	2,9	2,3	60	1,6	5,1	81	3,1	4,4
19	4,1	4,5	40	0,02	0,8	61	2,8	7,4	82	5,9	6,3
20	3,3	3,7	41	2,1	2,2	62	4,2	7,4	83	15,6	7,8
21	5,1	5,8	42	4,8	3,4	63	0,9	2,2	84	5,6	11,8

Таблица 4

Погрешности определения испарения за периоды залегания снежного покрова различной продолжительности

Число месяцев ПЗ	3	4	5	6	7	9
ОП, %	31	28	21	22	24	23
R	0,841	0,860	0,824	0,850	0,858	0,853
Число ПЗ	28	21	16	14	12	10

Примечание. R — коэффициент корреляции.

Погрешности определения испарения за периоды залегания снежного покрова различной продолжительности

Данные табл. 4 показывают, что с увеличением продолжительности ПЗ имеет место уменьшение относительной погрешности определения испарения за ПЗ. Это означает, что наибольших значений ОП достигает в южных районах страны при продолжительности ПЗ в 3–4 месяца и наименьших в северных при продолжительности ПЗ в 7–8 месяцев.

В заключение отметим, что в последние годы в Ученых записках РГГМУ был опубликован ряд работ, в которых предлагались новые методики расчета испарения как с поверхности суши [4, 8], так и с водной поверхности [9, 10]. Настоящая работа продолжает тематику, связанную с процессами испарения в природных условиях. Приведенные здесь карты показывают, каковы были испарение с поверхности снежного покрова и продолжительность залегания на территории России до начавшихся устойчивых изменений климата. Эта информация может представлять интерес как для гидрометеорологов, так и для географов. Она может оказаться полезной также для истории климата, ибо работы по испарению со снега отсутствовали.

Литература

1. *Алтайев А.М., Перченко Ф.Ф.* Суммарное испарение с поверхности снежного покрова на Европейской территории СССР // Изв. ВГО, 1963, т. 95, № 6, с. 495–503.
2. *Воейков А.И.* Влияние снеговой поверхности на климат // Избр. соч., 1949, т. 2, с. 9–14.
3. *Кузнецов В.И.* Испарение со снежного покрова // Труды ГГИ, 1964, вып. 109, с. 3–56.
4. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Гурьянов Д.А.* Малопараметрическая модель увлажнения северо-западного региона России для условий современного изменения климата // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 36, с. 32–48.
5. Материалы наблюдений над испарением с поверхности снежного покрова 1963–1975 гг. — Л.: Фотоофсетная лаборатория ВНИГЛ ГГИ, 1976. — 146 с.
6. Методы изучения и расчета водного баланса. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 397 с.
7. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. — М.: Росгидромет, 2008. — 227 с.
8. *Постников А.Н.* Метод расчета испарения с почвы в различных природных зонах // Учёные записки РГГМУ, 2009, № 10, с. 21–31.
9. *Постников А.Н.* Оценка норм испарения за безледоставный период с озёр и водохранилищ России и стран СНГ методом теплового баланса // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 25–34.
10. *Постников А.Н.* О распределении испарения с водной поверхности на территории России // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 36, с. 22–28.
11. Рекомендация по расчету испарения с поверхности суши. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 96 с.
12. *Смирнов Н.П., Малинин В.Н.* Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. — Л.: изд. ЛГУ, 1988. — 199 с.
13. Справочник по климату СССР. Влажность воздуха, атмосферные осадки. — Л.: Гидрометеиздат, 1966.
14. Указания по расчету по расчету испарения с поверхности суши (проект). — Л.: Фотоофсетная лаборатория ВНИГЛ ГГИ, 1970. — 55 с.