

*А.Н. Постников*

### О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*A.N. Postnikov*

### ABOUT EVAPORATION DISTRIBUTION FROM WATER SURFACE ON THE TERRITORY OF RUSSIA

*Представлена карта испарения с поверхности природных водоемов на территории России. Значения испарения при подготовке карты рассчитаны по формуле, базирующейся на уравнении теплового баланса водоемов.*

*Ключевые слова: карта испарения, природные водоемы, уравнение теплового баланса водоемов.*

*Evaporation map from surface of natural basins on the territory of Russia is presented. Evaporation values when preparing the map are calculated by the formula based on heat balance equation of basins.*

*Key words: evaporation map, natural basins, heat balance equation of basins.*

К настоящему времени известно достаточно много работ, в которых приводятся сведения об испарении с поверхности озер и водохранилищ, расположенных на территории России и некоторых сопредельных с ней государств. Среди этих работ в первую очередь следует назвать монографию З.А. Видулиной [1], а также «Рекомендации по расчетам водного баланса крупных озер и водохранилищ», изданные Государственным гидрологическим институтом. Данные этих работ дают представление об испарении с водной поверхности в различных точках территории бывшего Советского Союза, большинство из которых расположено в Европейской части. В 1969 г. для этой же территории была опубликована карта под названием «Средняя многолетняя величина испарения с водной поверхности испарительного бассейна площадью 20 м<sup>2</sup>(см)» [7]. Само название карты говорит о том, что речь здесь идет об испарении с небольшого (с поперечником 5 м) искусственно созданного объекта, которое, по-видимому, может давать только достаточно приближенное представление об испарении с реальных водных объектов.

Целью настоящей работы было построение карты испарения с поверхности водных объектов на территории России. Кратко изложим методику, которая использовалась при построении этой карты.

Если учитывать только наиболее важные составляющие теплового баланса водоема, то уравнение его теплового баланса за некоторый промежуток времени  $\Delta t$  можно записать в виде:

$$R = LE + P + \Delta W, \quad (1)$$

где  $R$  — радиационный баланс водной поверхности;  $LE$  — затраты тепла на испарение;  $P$  — турбулентный теплообмен между водной поверхностью и атмосферным воздухом;

$\Delta W$  — изменение запаса тепловой энергии в водоеме. Все составляющие в данной работе приводятся в кДж/м<sup>2</sup>. Если уравнение записано для всего безледоставного периода (БП) водоема, то с хорошим приближением можно считать, что  $\Delta W = 0$  [1, 4, 5], т.е. тепловые запасы водных масс водоема примерно одинаковы на начало (вскрытие от льда) и конец (установление ледового покрова) БП. Такое положение одинаково справедливо как для конкретного года, так и для среднесноголетних условий. Поэтому для всего БП уравнение теплового баланса упрощается:

$$R = LE + P. \quad (2)$$

Составим известное отношение Боуэна:

$$\frac{P}{LE} = \frac{0,64\Delta t}{\Delta e}, \quad (3)$$

где  $\Delta t$  — разность между температурами поверхности воды и воздуха на высоте 2 м;  $\Delta e$  — разность между парциальными давлениями насыщенного водяного пара при температуре водной поверхности и в воздухе на высоте 2 м. Исключив  $P$  из уравнения (1) с помощью (2), получим:

$$\frac{4 \cdot 10}{1 + 0,64\Delta t/\Delta e} \text{ мм}. \quad (4)$$

По уравнению (4) можно оценивать испарение с водоема в целом за БП конкретного года, а также средние многолетние значения (нормы) испарения с водоемов за безледоставные периоды. Однако для использования уравнения (4) необходимо иметь данные о радиационном балансе водной поверхности, наблюдения за которым на сетевых метеостанциях Гидрометслужбы до настоящего времени не проводятся. Вместе с тем, на актинометрических станциях проводятся измерения, позволяющие определить радиационный баланс поверхности суши ( $R_c$ ). Располагая данными о  $R_c$ , можно рассчитать значения  $R$  для поверхности водоемов, находящихся в районе расположения станции, по методике, предложенной Т.В. Кирилловой [2]. Согласно этой методике:

$$R = R_c + (Q_1 + Q_2)(\alpha_c - \alpha_b) + \sigma(T_c^4 - T_b^4), \quad (5)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  — соответственно прямая и рассеянная солнечная радиация;  $\alpha_c$  и  $\alpha_b$  — соответственно альbedo поверхности суши на территории актинометрической станции и альbedo водной поверхности;  $T_c$  и  $T_b$  — соответственно температура поверхности почвы на актинометрической станции и температура поверхности воды;  $\sigma = 1,47 \cdot 10^{-4}$  кДж<sup>1</sup>м<sup>-2</sup>мес<sup>-1</sup>град<sup>-4</sup> — постоянная Стефана–Больцмана.

В работе [5] по формуле (5) были рассчитаны значения радиационного баланса водной поверхности за каждый месяц безледоставного периода для избранных водоемов на территории России и отдельных сопредельных государств. Затем месячные

значения суммировались и находилось значение радиационного баланса за БП. Более подробно методика этого определения изложена в [5]. При этом расчеты были проведены по 17 средним и крупным озерам, (включая самые большие из них Ладожское, Байкал и Балхаш) и 14 водохранилищам, в число которых вошли волжские и днепровские, а также водохранилища, расположенные на сибирских реках. Полученные значения радиационного баланса водной поверхности за БП были сопоставлены с температурной характеристикой теплого периода года:

$$t_n = \sum t_i / 12, \quad (6)$$

где  $t_i$  — средняя температура за  $i$ -й месяц теплого периода.

К теплому периоду относились те месяцы, значения  $t_i$  для которых были больше нуля. Оказалось, что между  $R$  и  $t_n$ , если исключить горные озера Севан и Иссык-Куль а также водоемы Казахстана, существует достаточно тесная связь (коэффициент корреляции 0,93), которую можно аппроксимировать в виде уравнения:

$$R \cdot 10^{-4} = 21,3t_n + 27 \text{ кДж}^1 \text{ м}^{-2} \text{ БП}^{-1}. \quad (7)$$

Средняя относительная погрешность расчета  $R$  по зависимым исходным данным, т.е. по которым было построено уравнение, составляет 6 %.

Кроме  $R \cdot 10^{-4}$  уравнение (4) содержит также величину:

$$K_b = 1 / (1 + 0,64 Dt / De), \quad (8)$$

которую условно можно назвать коэффициентом Боуэна. В работе [5] значения  $K_b$  для каждого водоема были определены следующим образом. Величины  $\Delta t$  и  $De$  сначала определялись для каждого месяца теплого периода, затем находились их средние значения за теплый период, которые и подставлялись в выражение (8). В той же работе было установлено, что между значениями  $K_b$  и  $t_n$  существует линейная зависимость с коэффициентом корреляции 0,86, которую можно представить в виде:

$$K_b = 0,026t_n + 0,62. \quad (9)$$

С учетом (7) и (9) уравнение (4) можно записать следующим образом:

$$E = 4(21,3t_n + 27)(0,026t_n + 0,62) \text{ мм} / \text{БП}. \quad (10)$$

Уравнение (10) отображает зависимость испарения за БП с водоемов России и отдельных сопредельных государств от температуры теплого периода года. В таблице приведены результаты расчета испарения за БП по формуле (10) для отдельных водоемов России и некоторых сопредельных государств. Здесь же приводятся средние многолетние значения испарения с данных водоемов, заимствованные из источников, указанных в примечание к таблице.

## Среднее многолетнее испарение с водных объектов, мм

Водохранилища, озера, моря	$t_n, ^\circ\text{C}$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_n$	$E$	$\delta E$	$S\%$
Юшкозерское	4,5			382	382	362	-20	5
Выгозерско-Ондское	4,9			467	467	393	-74	16
Иваньковское	6,2	522		513	518	497	-21	4
Угличское	6,3	576		554	565	505	-60	11
Рыбинское	6,1	519	418		519	489	-30	6
Горьковское	6,5	611	597	596	601	522	-78	13
Куйбышевское	7,4	646	580	616	614	600	-14	2
Саратовское	8,3	668	650	656	658	681	23	4
Волгоградское	9,2	732	743	753	743	766	23	3
Цимлянское	9,6	1020		860	860	805	-55	6
Камское	5,9	466	490		478	472	-6	1
Воткинское	6,3	481	430		481	505	24	5
Павловское	6,2	504			504	497	-7	1
Новосибирское	6,2	656	336	534	508	497	-11	2
Красноярское	6,2	515	730		515	497	-18	3
Братское	5,0	384	391	411	395	400	6	1
Вилуйское	4,4	388	370		379	355	-24	6
Киевское	8,3	696	675	644	672	681	9	1
Кременчугское	9,0	787	670	671	709	747	38	5
Днепродзержинское	9,4	730		656	730	786	56	8
Днепровское	9,6	813		712	762	805	43	6
Каховское	10,2	824	810	796	810	865	55	7
Дубоссарское	9,7	817		689	817	815	-2	0
Бухтарминское	7,8	700	730		700	636	-64	9
Ладожское	5,4	344	378		378	432	54	14
Онежское	5,1	335	392		392	408	16	4
Чудско-Псковское	6,5	560	520		540	522	-18	3
Ильмень	6,3	420	590		505	505	0	0
Лача	5,3	401			401	424	23	6
Воже	5,5	480			480	440	-40	8
Таймыр	1,8		197		197	174	-23	12
Байкал	4,6	372	422		397	370	-27	7
Чаны	6,3	491			491	505	14	3
Телецкое	6,5	360		468	468	522	54	12
Ханка	7,7	584	624		624	627	3	0
Нарочь	7,2		544		544	582	38	7
Каспийское	12,0	1020			1020	1054	34	3
Аральское	10,9	960			960	936	-24	3

Примечание:  $E_1, E_2, E_3$  — испарение, значения которого заимствованы в источниках, указанных в списке литературы соответственно под номерами [1], [6], [3];  $E_n$  — принятые значения испарения;  $E$  — испарение, рассчитанное по формуле (10);  $\delta E$  — погрешность оценки испарения, равная  $(E - E_n)$ ;  $S$  — относительная погрешность оценки испарения, равная  $100|\delta E|/E_n$ .

Расчитанные значения испарения ( $E$ ) сравнивались с так называемым «принятым испарением» ( $E_n$ ), за которое принималось либо среднее по опубликованным данным, либо то значение из  $E_1, E_2, E_3$ , которое было наиболее близким к значению  $E$ . Последнее решение оправдано, на наш взгляд, исходя из соображения, что если две величины, полученные независимыми способами, мало различаются, то у них больше шансов, чем у прочих, оказаться ближе к истинному значению. Читатель, не согласный с таким подходом, имеет возможность по-своему оценить результаты расчета, исходя из значений  $E_1, E_2, E_3$ .

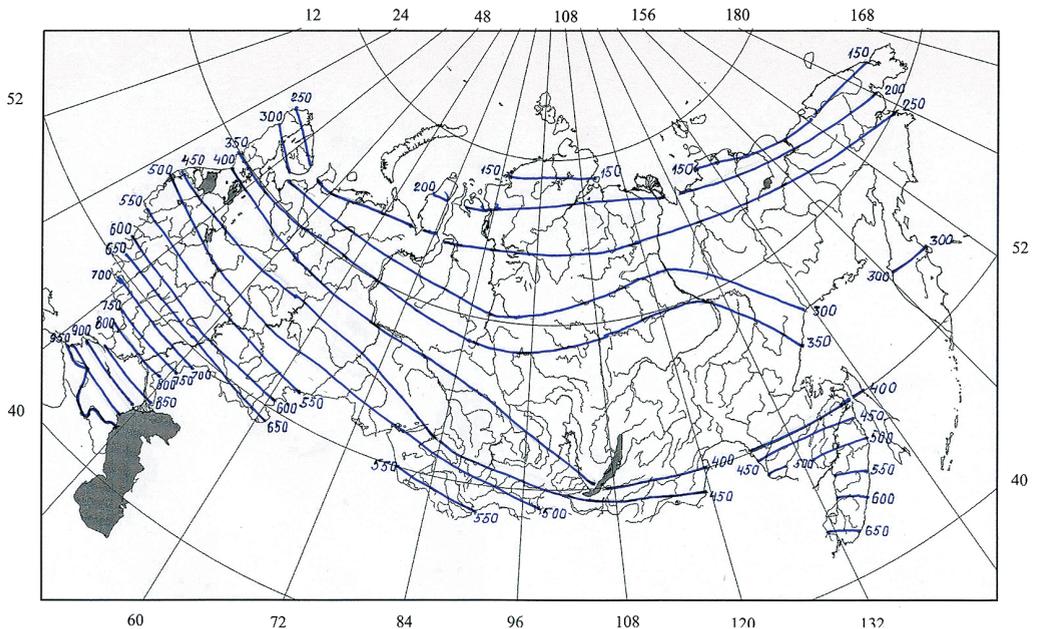
Полученные результаты можно кратко изложить следующим образом. Средние значения ( $E_n = 574$  мм,  $E = 572$  мм) практически совпадают, т.е. применение формулы (10) не приводит к заметной систематической погрешности. Средняя абсолютная погрешность расчета составляет 30 мм. Средняя относительная погрешность равна 5%. Коэффициент корреляции между принятыми и расчитанными значениями испарения достигает 0,98. К этому небезынтересно добавить следующее. При просмотре оценок испарения  $E_1, E_2, E_3$  можно заметить, что их значения для многих водоемов сильно различаются. Так, для водохранилищ Рыбинского, Цимлянского, Новосибирского, Красноярского, Днепродзержинского, Днепровского, Дубоссарского и озер Ильмень и Телецкое эти различия составляют более 100 мм (таблица). Для водоемов, по которым имелось две или три оценки нами были определены абсолютные величины разностей этих оценок. При наличии трех оценок находилась разность между наиболее различающимися значениями. Например, для Куйбышевского водохранилища ( $E_1 = 646$  мм,  $E_2 = 580$  мм,  $E_3 = 616$  мм) в расчет принималось значение  $E_1 - E_2 = 66$  мм. Водоемы, по которым имелась только одна оценка и сравнивать ее было не с чем, при проведении расчетов не учитывались. Среднее значение полученных таким способом абсолютных величин этих разностей, которое, по-видимому, можно считать средней абсолютной погрешностью определения норм испарения с рассматриваемых водоемов, составило 74 мм. Средняя же абсолютная погрешность (среднее  $|\delta E|$ ), как уже говорилось выше, составляет только 30 мм.

При анализе данных таблицы можно обнаружить также, например, что наибольшая по абсолютной величине погрешность расчета по формуле (10) равна 78 мм (Горьковское водохранилище), а наибольшие расхождения в оценках испарения по литературным источникам составляют 320, 215 и 160 мм — соответственно для Новосибирского, Красноярского и Цимлянского водохранилищ.

Может возникнуть замечание о том, что в полученном уравнении не учитывается глубина водоемов. Попробуем на это ответить. Роль глубины, безусловно, должна проявляться при формировании испарения за отдельные интервалы теплого периода, например, декады и месяцы. Действительно, по причине различного прогрева воды испарение с мелководного водоема в мае будет больше, а в сентябре, наоборот, меньше, чем с глубоководного. Однако здесь рассматривается только испарение в целом за БП, за который водоем получает и отдает одинаковое количество тепловой энергии, индикатором которой служит температура воздуха теплого периода года. Роль глубины наиболее значительно проявляется в участии при распределении во времени испарения внутри БП и становится менее заметной при сравнении испарения с водоемов с различной глубиной за весь БП. Предположим, что учет глубины позволил бы

уменьшить погрешность расчета, но можно ли ожидать значительного ее снижения, если коэффициент корреляции уравнения (10) уже составляет 0,98? По-видимому, ответ должен быть однозначно отрицательным.

Таким образом, имеются основания считать, что расчеты испарения с поверхности природных водоемов по формуле (10) могут давать достаточно надежные результаты. Поэтому расчеты при построении карты испарения с водной поверхности на территории России проводились по формуле (10). Для этой цели были определены значения  $t_n$  в общей сложности для 165 пунктов, более или менее равномерно расположенных по территории. На рисунке представлена карта, дающая представление об испарении с водной поверхности за безледоставные периоды с водоемов на территории России, рассчитанном по формуле (10), основанной на уравнении теплового баланса водной поверхности.



Среднее многолетнее испарение с поверхности природных водоемов за безледоставный период на территории России (мм)

Остается уточнить, поверхность водоемов какой площади здесь имеется в виду. По мнению автора, карта дает представление об испарении за БП с водоемов, начиная с площади их в несколько десятков квадратных километров, при этом, верхнего ограничения на площадь нет. Если сравнивать эту карту с картой, опубликованной в [7], то можно заметить, что новая карта почти повсеместно показывает более низкие значения испарения, чем прежняя. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что с поверхности испарительных бассейнов за счет более сильного прогревания воды, чем

в естественных водоемах, испарение идет интенсивнее, чем с поверхности последних. Исключение составляет Приморский край, где согласно опубликованной карте испарение на юге края не превышает 500 мм, в то время как на нашей карте оно здесь достигает 650 мм. Представляется, что опубликованная ранее величина по какой-то причине была занижена, так как даже с огромной, по сравнению с размерами испарительного бассейна, поверхности озера Ханка, по данным работы [3], испаряется 624 мм. Согласно данным таблицы, для морей Каспийского и Аральского формула (10) также дает значения испарения довольно близкие к опубликованным.

Автор надеется, что данные представленной здесь карты окажутся полезными для оценок норм испарения в целом за БП с природных водных объектов в различных зонах нашей страны, а формула (10) может быть использована как для аналогичных оценок, так и для расчета испарения за отдельные безледоставные периоды.

### Литература

1. *Викулина З.А.* Водный баланс озер и водохранилищ Советского Союза. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. *Vikulina Z.A.* Vodnyj balans ozer i vodohranilishh Sovetskogo Sojuza. — L.: Gidrometeoizdat, 1979.
2. *Кириллова Т.В.* Радиационный режим озер и водохранилищ. — Л.: Гидрометеоздат, 1970. *Kirillova T.V.* Radiacionnyj rezhim ozer i vodohranilishh. — L.: Gidrometeoizdat, 1970.
3. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. — Л.: Гидрометеоздат, 1985. *Mногоletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushi.* — L.: Gidrometeoizdat, 1985.
4. *Постников А.Н.* Приближенный метод оценки испарения с озер и водохранилищ. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 13, с. 21–29. *Postnikov A.N.* Priblizhennyj metod ocenki isparenija s ozer i vodohranilishh. // Uchenye zapiski RGGMU, 2010, № 13, s. 21–29.
5. *Постников А.Н.* Оценка норм испарения за безледоставный период с озер и водохранилищ России и отдельных стран СНГ методом теплового баланса. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 26, с.25–33. *Postnikov A.N.* Ocenka norm isparenija za bezledostavnyj period s ozer i vodohranilishh Rossii i otdel'nyh stran SNG metodom teplovogo balansa. // Uchenye zapiski RGGMU, 2012, № 26, s.25–33.
6. Рекомендации по расчетам водного баланса крупных озер и водохранилищ. — Л.: Гидрометеоздат, 1989. *Rekomendacii po raschetam vodnogo balansa krupnyh ozer i vodohranilishh.* — L.: Gidrometeo-izdat, 1989.
7. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. — Л.: Гидрометеоздат, 1969. *Ukazanija po raschetu isparenija s poverhnosti vodoemov.* — L.: Gidrometeoizdat, 1969.