

В. С. Вуглинский, И. П. Албул

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО ИСПАРИТЕЛЯ ГГИ-3000

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Предложена методика расчета среднемесячных величин испарения с водной поверхности по данным континентального испарителя ГГИ-3000. Методика основана на учете зональных особенностей изменения испарения. В качестве показателя зональности использована широта местности. Методика позволяет рассчитывать испарение с водной поверхности за июнь—сентябрь. Независимая проверка показала, что предложенная расчетная схема позволяет оценивать среднемесячные значения испарения с водной поверхности в подавляющем большинстве случаев с погрешностями $\pm 15\text{--}20\%$. Библиогр. 5 назв. Ил. 3. Табл. 2.

Ключевые слова: среднемесячное испарение, водная поверхность, методика расчета, данные континентального испарителя ГГИ-3000.

V. S. Vuglinsky, I. P. Albul

METHOD FOR CALCULATION OF EVAPORATION FROM WATER SURFACE BASED ON DATA FROM CONTINENTAL EVAPORATION PAN GGI-3000

Saint Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

A method for calculating the mean monthly sum of evaporation from the water surface using data from the continental GGI-3000 evaporation pan is proposed. It is based on zonal characteristic features of evaporation. A latitude was used as a zonality indicator. This method allows for calculating evaporation from the water surface for the months of June, July, August and September. Testing the method with independent data reflected that it allows to estimate mean monthly sum of evaporation from the water surface with errors $\pm 15\div 20\%$. Refs. 5. Figs. 3. Tabl. 2.

Keywords: mean monthly sum of evaporation, water surface, method for calculation, continental GGI-3000 evaporation pan data.

За время использования водноиспарительной сети накоплены обширные материалы наблюдений не только за испарением с водной поверхности, но и за целым комплексом гидрометеорологических элементов, обуславливающих процесс испарения. Максимальное количество данных имеется по континентальному испарителю ГГИ-3000. Однако несмотря на наличие обширных материалов наблюдений по наземным (континентальным) испарителям ГГИ-3000, надежная методика перехода показаний этих приборов к реальным значениям испарения с водоема еще не разработана.

В связи с тем что континентальный испаритель ГГИ-3000 является прибором, массово эксплуатирующимся по водноиспарительной сети Российской Федерации, особое внимание должно быть уделено разработке необходимой методики.

Пик развития сети континентальных испарителей ГГИ-3000 в бывшем СССР пришелся на середину 1980-х гг., когда их насчитывалось более 400. К сожалению,

с середины следующего десятилетия она начала быстро сокращаться и в настоящее время в России функционируют всего около 80 единиц.

В указаниях [1] предложена методика расчета испарения по данным наземного испарительного бассейна площадью 20 м^2 , но она рекомендована для определения испарения только с водоемов площадью не более 5 км^2 . Трудями отечественных ученых [2–4] установлено, что помимо плавучего испарительного бассейна площадью 20 м^2 , который является эталоном, наиболее близкими к реальному испарению с поверхности воды являются показания плавучих испарителей ГГИ-3000, оборудованных на плотках. Однако количество таких испарителей ограничено, расположены они по территории России неравномерно и периоды наблюдений на них не совпадают и часто составляют менее 10 лет. В этих условиях были выведены переходные формулы, позволяющие рассчитать среднемесячные величины испарения с водной поверхности и включающие различные поправочные коэффициенты и параметры.

В работе [3] представлена формула для расчета месячных сумм испарения с водоема по данным наземного испарителя ГГИ-3000. Основными параметрами формулы являются полуденная высота солнца 15-го числа месяца и ее приращение за этот месяц, а также продолжительность светлого времени суток 15-го числа месяца и ее приращение за месяц. По существу, данные параметры являются константами, зависящими только от места установки каждого испарителя, никак не связанными с непосредственными факторами, определяющими процесс испарения. По данным В. С. Голубева и А. П. Урываева, ошибки расчета испарения с водоема по предложенной формуле, особенно в весенние и осенние месяцы, могут достигать 20–30 %.

В работе [2] также приведена методика расчета испарения с водоема по данным континентального испарителя ГГИ-3000. Ее суть заключается в том, что сначала осуществляется «приведение» показаний указанного испарителя к показаниям плавучего испарителя аналогичной конструкции путем определения так называемого гидрометеорологического коэффициента для учета различий в гидрометеорологических условиях мест расположения континентального и плавучего испарителей. Затем полученные значения испарения с плавучего испарителя пересчитываются в значения испарения с водной поверхности за счет введения поправочного коэффициента 0,86 (инструментальный коэффициент, характеризующий различия в величинах испарения, измеренных плавучим испарителем ГГИ-3000 и плавучим испарительным бассейном площадью 20 м^2).

Плавучий испарительный бассейн как известно, признан ВМО временным эталоном, показания которого характеризуют реальное испарение с водоема в месте его установки. Погрешности определения месячных значений испарения с водоема по предложенной методике могут достигать в отдельные месяцы 20–25 %. Основная причина столь значительных ошибок, по мнению авторов, связана с определением гидрометеорологического коэффициента по эмпирической схеме, в которой многие параметры являются осредненными величинами или константами.

Авторы настоящей статьи предприняли попытку разработки новой расчетной схемы с использованием показаний наземных испарителей ГГИ-3000, в основу которой положены обобщенные данные плавучих испарителей аналогичной конструкции.

Методика расчета

В качестве расчетных рассматривались среднемесячные значения испарения с водной поверхности. Для получения реальных значений использовались показатели плавучего испарителя ГГИ-3000, умноженные на коэффициент 0,86 («приведенные» к показаниям эталонного прибора — плавучего испарительного бассейна площадью 20 м²). «Исправленные» данные сопоставлялись с аналогичными данными по континентальному бассейну площадью 20 м² и континентальному испарителю ГГИ-3000. Одновременные наблюдения по всем трем указанным видам приборов выполнялись только на четырех водноиспарительных станциях (Валдай, Запорожье, Зеленогорск, Квашнино) в 1952–1985 гг. Всего анализируемая выборка включала около 300 среднемесячных значений испарения, полученных по трем видам приборов для теплого периода года с мая по октябрь. Значения испарения за одни и те же месяцы разных лет каждой из четырех станций осреднялись и после этого использовались для дальнейших обобщений. Вначале определялись значения двух коэффициентов (K_1 и K_2), характеризующих отношения месячных величин испарения, полученных по континентальному бассейну — E_{20} , и месячных величин испарения, полученных по континентальному испарителю ГГИ-3000 — E_{3000} , к «приведенным» значениям месячного испарения по плавучему испарителю ГГИ-3000 — E_{3000}^* . Поскольку значения испарения с водной поверхности зависят главным образом от тепловых ресурсов территории, а последние увеличиваются с севера на юг, были построены обобщенные графики связи полученных значений коэффициентов K_1 и K_2 с широтой местности (учитывая местоположение станций). Из-за ограниченного объема исходных данных за май и октябрь графики были построены только для периода июнь—сентябрь (рис. 1). Далее для каждого месяца и каждой станции с графиков были сняты «сглаженные» значения коэффициентов K_1' и K_2' . В табл. 1 приведены значения коэффициентов K_1 и K_2 и K_1' и K_2' .

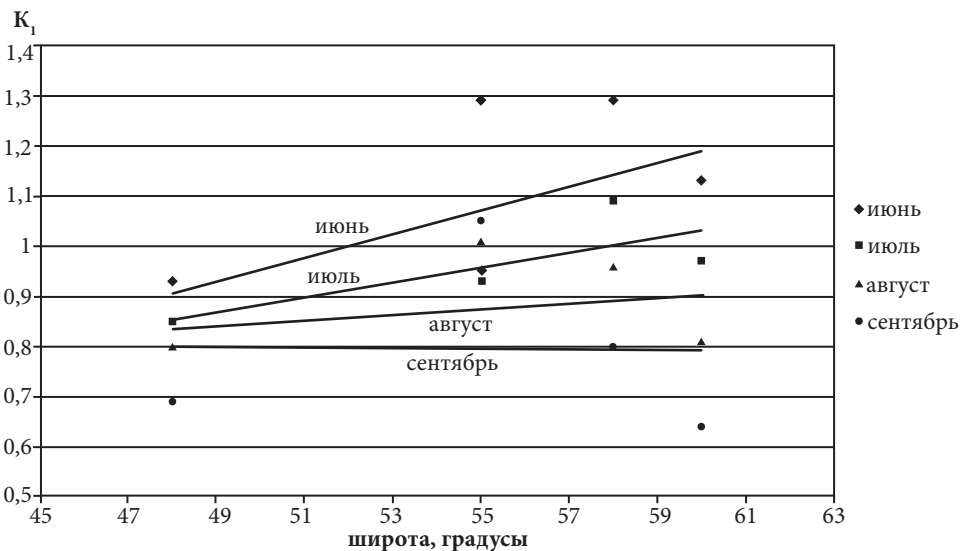


Рис. 1. Графики связи коэффициента K_1 с широтой местности

Таблица 1. Значения фактических и «сглаженных» коэффициентов и параметра Δ

Пункт наблюдений (широта)	Расчетный месяц	Коэффициенты				$\Delta = K_2' - K_1'$
		K_1	K_1'	K_2	K_2'	
Зеленогорск (60° с. ш.)	Июнь	1,13	1,19	1,28	1,30	0,11
	Июль	0,97	1,03	1,10	1,09	0,06
	Август	0,81	0,90	0,88	0,95	0,05
	Сентябрь	0,64	0,79	0,63	0,82	0,03
Валдай (58° с. ш.)	Июнь	1,29	1,14	1,26	1,28	0,14
	Июль	1,09	1,00	1,06	1,08	0,08
	Август	0,96	0,89	0,99	0,96	0,07
	Сентябрь	0,80	0,79	0,86	0,84	0,05
Квашнино (55° с. ш.)	Июнь	0,95	1,07	1,30	1,25	0,18
	Июль	0,93	0,96	1,07	1,07	0,11
	Август	0,93	0,87	1,05	0,97	0,10
	Сентябрь	1,05	0,80	1,18	0,87	0,07
Запорожье (48° с. ш.)	Май	1,09	1,09	1,42	1,42	0,33
	Июнь	0,93	0,90	1,16	1,18	0,28
	Июль	0,85	0,86	1,04	1,04	0,18
	Август	0,80	0,84	0,96	1,00	0,16
	Сентябрь	0,69	0,80	0,80	0,93	0,13
	Октябрь	0,58	0,58	0,66	0,66	0,08

Анализ значений коэффициентов позволил установить характерную тенденцию — их значения уменьшаются с возрастанием номера месяца для всех четырех станций. Обнаружилась и вторая закономерность — значения коэффициентов, полученных по данным континентального испарителя ГГИ-3000 (K_2 и K_2'), всегда превышают коэффициенты, полученные по данным континентального испарительно-го бассейна (K_1 и K_1').

Приведенные в таблице значения параметра Δ представляют собой разность коэффициентов K_2' и K_1' , т. е., $\Delta = K_2' - K_1'$.

Примечательно, что эти разности также уменьшаются с увеличением номера месяца для каждой станции, при этом по абсолютным значениям для каждого месяца они увеличиваются с широтой. Последнее обстоятельство послужило основанием для построения графиков связи значений Δ с широтой местности для каждого отдельного месяца. Графики связи были построены для данных с июня по сентябрь (рис. 2) и характеризуются высокими коэффициентами корреляции — выше 0,99. Данные графики явились основой для последующей разработки расчетной схемы.

Очевидно, что значение Δ для любого месяца будет определяться по выражению

$$\Delta = K_2' - K_1' = E_{3000}/E_{3000}^* - E_{20}/E_{3000}^* = (E_{3000} - E_{20})/E_{3000}^*. \quad (1)$$

Из выражения (1) получаем

$$E_{3000}^* = (E_{3000} - E_{20})/\Delta. \quad (2)$$

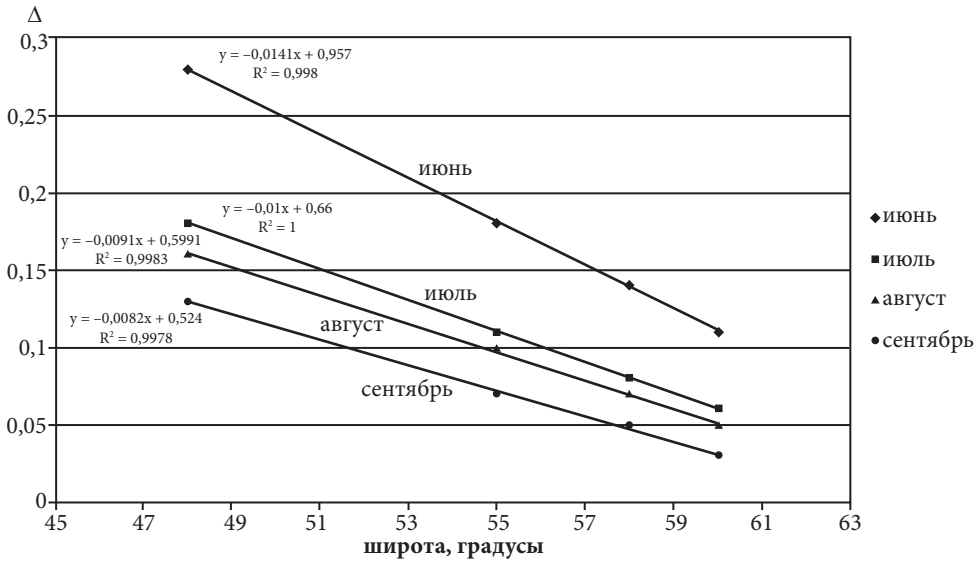


Рис. 2. График зависимости параметра Δ от широты местности

В выражение (2) входит величина испарения E_{20} , которая не должна присутствовать в расчетной схеме. Поэтому можно определять эту величину с использованием графиков связи с величинами E_{3000}^* по соответствующим уравнениям, полученным для каждого из четырех месяцев. Графики связи представлены на рис. 3. Полученные уравнения связи:

для июня

$$E_{20} = 0,6319 E_{3000}^{**} + 36,611; \quad (3)$$

для июля

$$E_{20} = 0,7097 E_{3000}^{**} + 21,464; \quad (4)$$

для августа

$$E_{20} = 0,7484 E_{3000}^{**} + 6,8881; \quad (5)$$

для сентября

$$E_{20} = 0,6816 E_{3000}^{**} + 2,1913. \quad (6)$$

Они характеризуются высокими коэффициентами корреляции $r = 0,85 - 0,93$.

В выражениях (3)–(6) значения испарения с водной поверхности по плавучему испарителю обозначаются E_{3000}^{**} , чтобы подчеркнуть, что это не фактические, а расчетные значения.

Подставляя в уравнение (2) выражения, полученные для E_{20} , отождествляя E_{3000}^* и E_{3000}^{**} и решая это уравнение для каждого месяца, получаем следующие расчетные формулы:

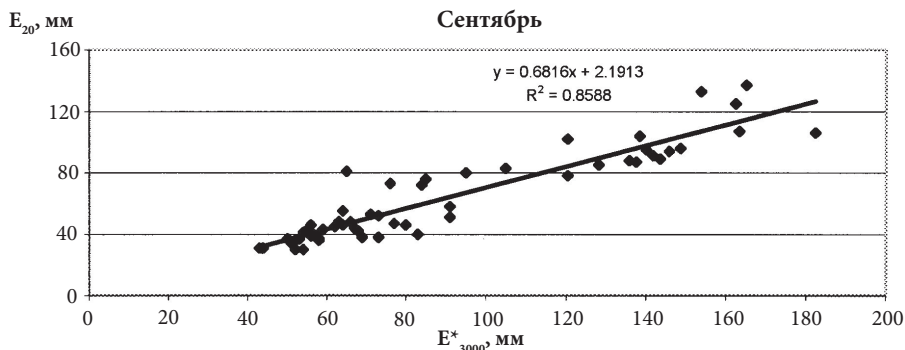
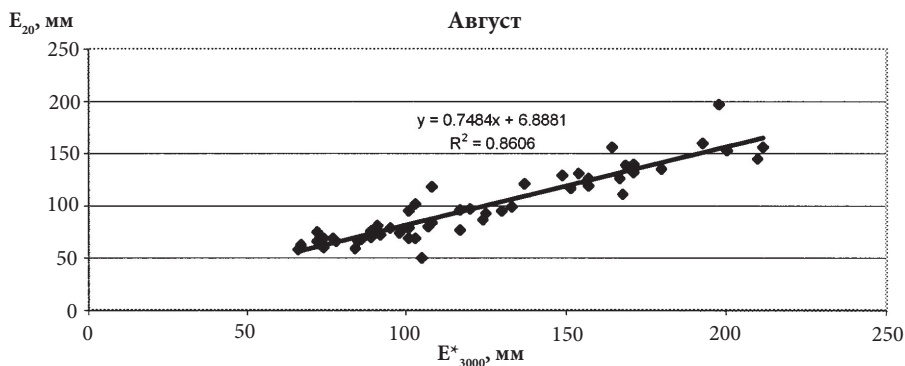
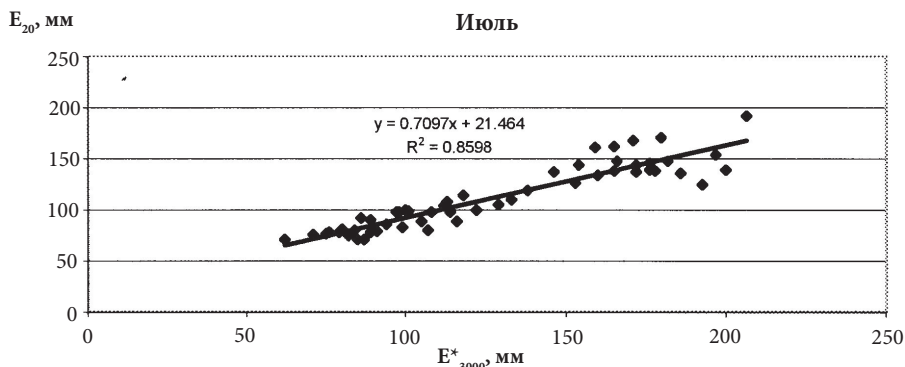
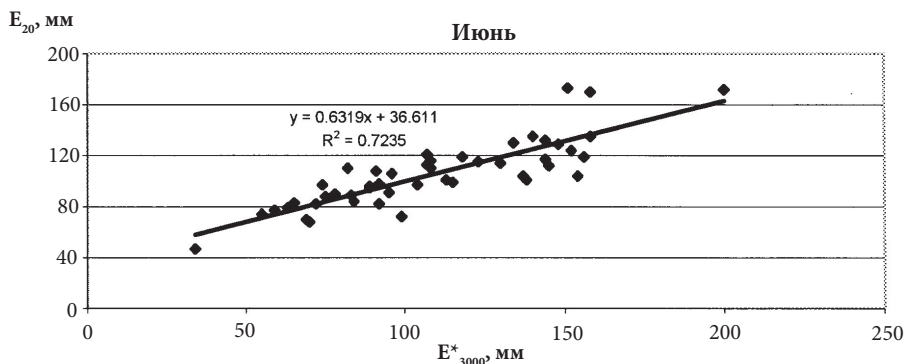


Рис. 3. Графики связи между E_{20} и E_{3000}^*

для июня

$$E_{3000}^{**} = (E_{3000} - 36,611)/(\Delta + 0,6319); \quad (7)$$

для июля

$$E_{3000}^{**} = (E_{3000} - 21,464)/(\Delta + 0,7097); \quad (8)$$

для августа

$$E_{3000}^{**} = (E_{3000} - 6,8881)/(\Delta + 0,7484); \quad (9)$$

для сентября

$$E_{3000}^{**} = (E_{3000} - 2,1913)/(\Delta + 0,6816). \quad (10)$$

Полученные формулы позволяют рассчитать значения испарения с реального водоема по данным континентального испарителя ГГИ-3000.

Проверка расчетной схемы

Для проверки предложенной расчетной схемы были привлечены ранее не использованные результаты наблюдений по пяти пунктам водноиспарительной сети: Аргаяш, Арыктах, Исетское, Селезневка и Тийрикоя. Выборка составила 148 среднемесячных значений испарения по континентальному испарителю ГГИ-3000 и столько же среднемесячных значений испарения по плавучему испарителю ГГИ-3000, за июнь—сентябрь. При этом выборки по различным станциям охватывали разное число лет и в целом период 1954–1986 гг. Проверка заключалась в сопоставлении величин испарения, полученных по предложенной расчетной схеме и по другим методикам (всего пять различных подходов).

За эталонные были приняты величины испарения с водной поверхности, полученные по плавучему испарителю ГГИ-3000 и приведенные к значениям плавучего испарительного бассейна площадью 20 м^2 — E_{3000}^* . С этими «эталонными» значениями сравнивались величины испарения, рассчитанные по предложенной схеме, а также по формуле ГГИ с использованием значений метеоэлементов по данным наблюдений на водоеме и ближайшей метеостанции, с поправкой на водоем [1].

Помимо этого для сравнения были задействованы величины испарения, полученные по методам Вуглинского [5] и Голубева [3].

В табл. 2 представлены обобщенные по каждой станции и для каждого месяца значения испарения. Там же приводятся погрешности их определения по сравнению с эталонными значениями испарения. Анализ этих данных показал, что наименьшие погрешности имеют место при расчете испарения по формуле ГГИ с использованием метеоэлементов, полученных по наблюдениям на водоеме. Величины отклонений колеблются в среднем в пределах $5\div 10\%$ и достигают максимальных значений в июне и сентябре. Например, для станции Аргаяш в сентябре погрешность составила 30% .

При использовании формулы ГГИ во втором варианте погрешности возрастают. В среднем они составили $20\text{--}30\%$, а в июне и сентябре достигали $60\text{--}70\%$.

Характерной тенденцией для всех станций является изменение знака погрешности от июня к сентябрю. Если в июне он положителен, то с июля по сентябрь — отрицательный. Это свидетельствует о том, что при данном способе определения испарения образуются систематические погрешности, которые связаны с неучетом сезонных различий в ходе температуры воздуха на суше и воды в водоеме. Весной температура воздуха на суше всегда выше, а осенью ниже температуры воды в водоеме. Поскольку при таком подходе температура воды водоема определяется по данным температуры воздуха на метеостанции без введения каких-либо корректирующих коэффициентов, погрешности определения испарения возрастают.

Погрешности определения испарения при использовании методов Вуглинского и Голубева оказались выше, чем при применении формулы ГГИ в двух вариантах, при этом по первой методике все значения погрешностей оказались с положительным знаком, что говорит о систематическом завышении величин испарения по сравнению с эталонными значениями.

Сопоставление значений испарения, полученных по предложенной расчетной схеме, с эталонными значениями показало, что в большинстве случаев погрешности составляют 15–20%. Наибольшие погрешности определены для июня и июля. Для июня максимальная погрешность по станции Аргаяш составила 67%, а для июля по станции Селезневка составила 43%.

В целом же значения погрешностей, полученных по предложенной методике оказались меньше, чем при использовании формулы ГГИ (второй вариант) и методик Голубева и Вуглинского.

Следует отметить, что значения погрешностей, полученные при использовании расчетных схем для пункта Селезневка, в среднем оказались выше, чем для всех остальных пунктов наблюдений. Это объясняется тем, что Бухтарминское водохранилище имеет отличные от озер условия формирования водного режима вследствие искусственного регулирования попусков.

Заключение

Предложена методика расчета испарения с водной поверхности по данным континентального испарителя ГГИ-3000, основанная на учете зональных особенностей изменения испарения. В качестве показателя зональности принята широта местности. Расчетная схема предложена для определения среднемесячных значений испарения в июне—сентябре, т. е. в те месяцы года, когда испарение является наибольшим. Основой расчетной методики являются графики зависимости коэффициентов K_1 и K_2 (соответственно отношения месячных величин испарения по континентальному испарительному бассейну площадью 20 м² и по континентальному испарителю ГГИ-3000 к «эталонным» значениям испарения) с широтой местоположения пунктов наблюдений. На основании этих графиков и некоторых последующих преобразований получены обобщенные расчетные формулы для определения величин испарения с водной поверхности в июне, июле, августе и сентябре, основным аргументом в которых являются значения испарения по континентальному испарителю ГГИ-3000. Проверка расчетной методики на независимых данных показала, что предложенная расчетная схема позволяет оценивать среднемесячные

Таблица 2. Результаты сопоставимости значений испарения

Станция (водоем)	Месяц	Испарение, мм				
		E_{3000}^* (число случаев)	Формула ГГИ, 1 вариант, $E_{ГГИ}$ (число случаев)	$\frac{E_{ГГИ}^* - E_{3000}^*}{E_{3000}^*} \cdot 100\%$	Формула ГГИ, 2 вариант, $E_{ГГИ}^*$ (число случаев)	$\frac{E_{ГГИ}^* - E_{3000}^*}{E_{3000}^*} \cdot 100\%$
1	2	3	4	5	6	7
Аргаяш (Аргаяш)	июнь	78(5)	70(1)	-10	123(2)	58
	июль	131(7)	135(1)	3	108(2)	-18
	август	122(8)	103(3)	-16	71(3)	-42
	сентябрь	81(8)	57(1)	-30	50(2)	-38
Арыкташ (Неджели)	июль	123(8)	123(18)	0	128(6)	4
	август	90(18)	88(18)	-2	67(6)	-26
	сентябрь	51(14)	49(14)	-4	28(6)	-45
Исетское (Исетское)	июнь	97(3)	86(3)	-11	127(4)	31
	июль	128(3)	109(3)	-15	122(4)	-5
	август	93(3)	82(4)	-12	76(4)	-18
	сентябрь	62(3)	60(4)	-3	57(4)	-8
Селезневка (Бухтар- минское)	июнь	80(6)	82(6)	3	109(5)	36
	июль	111(6)	119(6)	7	112(5)	1
	август	130(7)	137(7)	5	85(5)	-35
	сентябрь	107(7)	104(7)	-3	35(5)	-67
Тийрикоя (Чудское)	июнь	105(6)	109(7)	4		
	июль	106(9)	111(10)	5	110(9)	4
	август	94(9)	97(10)	3	88(9)	-6
	сентябрь	58(8)	58(8)	0	55(8)	-5

значения испарения с водной поверхности в подавляющем большинстве случаев с погрешностями $\pm 15-20\%$. Только в отдельных случаях погрешности превысили указанные значения.

Сопоставление результатов расчетов по предложенной методике с данными, полученными по формуле ГГИ (в двух вариантах), методам Голубева и Вуглинского показало, что только при расчете по формуле ГГИ с использованием значений метеозаэментов, полученных для водной поверхности, результаты расчетов оказались более точными.

Целесообразна дальнейшая проверка предложенной расчетной схемы для определения испарения с водной поверхности в различных ландшафтных условиях территории России.

с водной поверхности, полученных разными способами

Предложенная расчетная формула, E_{3000}^{**} (число случаев)	$\frac{E_{3000}^{**} - E_{3000}^*}{E_{3000}^*} \cdot 100\%$	Испарение по методу Вуглинского, E_B (число случаев)	$\frac{E_B - E_{3000}^*}{E_{3000}^*} \cdot 100\%$	Испарение по методу Голубева, E_G (число случаев)	$\frac{E_G - E_{3000}^*}{E_{3000}^*} \cdot 100\%$
8	9	10	11	12	13
130(5)	67	150(5)	92	101(5)	29
129(7)	-2	148(7)	13	116(7)	-11
113(8)	-7	137(8)	12	112(8)	-8
106(8)	31	115(8)	42	95(8)	17
114(18)	-7	137(18)	11	108(18)	-12
87(18)	-3	112(18)	24	113(18)	26
53(14)	4	64(14)	25	83(14)	63
70(3)	-28	129(3)	33	80(3)	-18
118(3)	-8	145(3)	13	111(3)	-13
83(3)	-11	112(3)	20	100(3)	8
75(3)	21	88(3)	42	85(3)	37
119(6)	49	151(6)	89	110(6)	37
159(6)	43	165(6)	49	133(6)	20
169(7)	30	161(7)	24	138(7)	6
115(7)	7	130(7)	21	104(7)	-3
77(6)	-27	130(6)	24	80(6)	-24
94(9)	-11	131(9)	24	104(9)	-2
84(9)	-11	108(9)	15	103(9)	10
58(8)	0	72(8)	24	80(8)	38

Литература

1. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 84 с.
2. Вуглинский В. С., Старовойтова В. К., Черская Е. Н. О методике оценки испарения с поверхности водоема по данным континентального испарителя ГГИ-3000 // Труды ГГИ. 1981. Вып. 274. С. 53–72.
3. Голубев В. С., Урываев А. П. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов // Труды ГГИ. 1983. Вып. 289. С. 69–76.
4. Кузнецов В. И. Методика расчета испарения с бассейнов площадью 20 м² по наблюдениям в испарителях ГГИ-3000 // Труды ГГИ. 1970. Вып. 181. С. 3–32.
5. Вуглинский В. С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 223 с.

Для цитирования: Вуглинский В. С., Албул И. П. Методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземного испарителя ГГИ-3000 // Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География. 2016. Вып. 3. С. 118–128. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.309

References

1. *Ukazaniia po raschetu ispareniiia s poverkhnosti vodoemov* [Guide to estimating evaporation from water surfaces]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 84 p. (In Russian)
2. Vuglinskii V.S., Starovoitova V.K., Cherskaia E.N. O metodike otsenki ispareniiia s poverkhnosti vodoema po dannym kontinental'nogo isparitel'ia GGI-3000 [On the method for assessing evaporation from water surfaces using GGI-3000 evaporation pan data]. *Trudy GGI*, 1981, issue 274, pp. 53–72. (In Russian)
3. Golubev V.S., Uryvaev A.P. Metod vodnykh isparitelei i ego primeneniie dlia rascheta ispareniiia s poverkhnosti vodoemov [Evaporimeter method and its application for calculating evaporation from water surfaces]. *Trudy GGI*, 1983, issue 289, pp. 69–76. (In Russian)
4. Kuznetsov V.I. Metodika rascheta ispareniiia s basseinov ploshchad'iu 20 m² po nabliudeniiam v ispariteliakh GGI-3000 [Methodology for calculating evaporation from basins with surface area of 20 m² using measurements by GGI-3000 evaporation pans]. *Trudy GGI*, 1970, issue 181, pp. 3–32. (In Russian)
5. Vuglinskii V.S. *Vodnye resursy i vodnyi balans krupnykh vodokhranilishch SSSR* [Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991. 223 p. (In Russian)

For citation: Vuglinsky V.S., Albul I.P. Method for calculation of evaporation from water surface based on data from continental evaporation pan GGI-3000. *Vestnik SPbSU. Series 7. Geology. Geography*, 2016, issue 3, pp. 118–128. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.309

Статья поступила в редакцию 20 октября 2015 г.

Контактная информация:

Vuglinskii Valeriy Sergeevich — доктор географических наук, профессор; vvuglins@mail.ru
Albul Ivan Petrovich — аспирант; ivanalbul@list.ru

Vuglinsky Valeriy S. — Doctor of Geographic Sciences, Professor; vvuglins@mail.ru
Abul Ivan P. — Postgraduate; ivanalbul@list.ru