

А.Н. Постников

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ИСПАРЕНИЯ С ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ

A.N. Postnikov

APPROXIMATIVE EVAPORATION ESTIMATE METHOD FROM LAKES AND RESERVOIRS

Предлагается приближенный метод оценки испарения с поверхности озер и водохранилищ, основанный на тесной связи между испарением и температурной характеристикой безледоставного периода.

Ключевые слова: испарение, озера и водохранилища, температура.

Approximate method of estimate of evaporation from the surface of lakes and reservoirs based on close connection between evaporation and temperature characteristic within period without ice is offered.

Key words: evaporation, lakes and reservoirs, temperature.

К настоящему времени известно несколько методов расчета испарения с водной поверхности. Это методы теплового баланса, турбулентной диффузии, водного баланса и гидрометеорологический, заключающийся в использовании эмпирических (полуэмпирических) формул. Первые три метода требуют большого количества информации о различных гидрометеорологических величинах и, ввиду недостатка таковой, редко используются на практике. Метод водного баланса применим для расчета испарения при условии, что остальные составляющие баланса определены с достаточной точностью. Такие условия оказываются выполнимыми, как правило, только при расчетах годового или средне-многолетнего испарения для бессточных озер, где испарение сопоставимо по величине с приходной частью баланса. Поэтому на практике эмпирические формулы остаются единственным средством для расчета испарения с поверхности озер и водохранилищ. Количество их весьма велико. Так, в «Гидрологическом словаре» [Чеботарев, 1978] уже находим двенадцать подобных формул. Большинство из них базируется на законе Дальтона, согласно которому испарение пропорционально величине $(e_n - e_2)$:

$$E = \alpha (e_n - e_2), \quad (1)$$

где E – испарение; e_n – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды; e_2 – парциальное давление водяного пара в воздухе на уровне 2 м от поверхности воды; α – коэффициент пропорциональности, или, точнее, коэффициент обмена.

Формулы различных авторов различаются способом представления коэффициента α . Имеются также формулы, в которых величина $(e_n - e_2)$ заменена на дефицит влажности воздуха на уровне 2 м, т.е. на величину $(e_0 - e_2)$, где e_0 – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха на

уровне 2 м от поверхности на метеостанции, где проводятся наблюдения. Отметим, что в ряде работ, например [Постников, 2009], дефицит влажности воздуха используется в качестве определяющего фактора также в методиках расчета испарения с поверхности почвы.

При использовании эмпирических формул необходимо иметь данные о температуре поверхности воды на всей акватории водоема, а также о температуре и влажности воздуха и скорости ветра над всей акваторией. Перечисленные данные могут быть получены только расчетным путем, так как метеорологические наблюдения над поверхностью водоемов не проводятся. Этот расчет связан с определенными погрешностями, что снижает точность оценок испарения. Многое, по-видимому, здесь зависит и от квалификации лиц, выполняющих расчеты, что также может приводить к заметно различающимся оценкам испарения с одного и того же объекта. Так, например, согласно работе [Викулина, 1979], средние многолетние значения испарения с поверхности Цимлянского водохранилища составляют 1020 мм, а Кайракумского – 1300 мм, а по работе [Многолетние данные..., 1985] эти величины составляют соответственно 860 и 816 мм.

В настоящей работе предлагается метод приближенной оценки испарения с поверхности водных объектов, что называется «на скорую руку», когда требуется получить примерное представление о величине испарения с того или иного водоема, не располагая при этом подробной информацией об исходных данных, которые требуются для применения той или иной формулы. Перейдем к обоснованию метода.

Уравнение теплового баланса водоема за некоторый промежуток времени может быть записано в виде:

$$R = LE + P + \Delta W, \quad (2)$$

где R – радиационный баланс водной поверхности; LE – затраты тепла на испарение (E – испарение, L – удельная теплота испарения); P – турбулентный поток тепла между водной поверхностью и атмосферным воздухом; ΔW – изменение запасов тепловой энергии в водоеме.

Если уравнение (2) записано для всего безледоставного периода (БП) водоема, то с хорошим приближением можно считать [Викулина, 1979], что $\Delta W \approx 0$, т.е. тепловые запасы водных масс водоемов примерно одинаковы на начало и конец БП. Поэтому уравнение для всего БП упрощается:

$$R = LE + P. \quad (3)$$

Турбулентный поток тепла в первую половину БП, как правило, имеет отрицательный знак (направлен из атмосферы к водной поверхности), а во вторую – положительный (направлен от водной поверхности в атмосферу). Поэтому суммарный турбулентный поток тепла за весь БП невелик и заметно меньше затрат тепла на испарение. Таким образом, основная (подавляющая) часть радиационного баланса расходуется на испарение. Поэтому если бы имелась методика

расчета радиационного баланса водной поверхности, то по известным значениям R можно было бы попытаться, хотя бы приближенно, оценить испарение с водоема за весь БП. К сожалению, в настоящее время не существует методики, позволяющей определять радиационный баланс водной поверхности по данным стандартных метеорологических наблюдений, и на сети Гидрометслужбы не проводятся регулярные наблюдения за его составляющими над акваториями водоемов. Величина R небольших водоемов оценивается, как правило, путем пересчета составляющих радиационного баланса суши, определяемых по данным наблюдений расположенных вблизи водоемов актинометрических станций [Кириллова, 1970], количество которых невелико, и поэтому такая методика может быть использована только в ограниченных пределах.

В целях преодоления возникших затруднений автор решил обратиться к работе [Постников, 2004], в которой для среднемноголетних условий было установлено существование тесной зависимости радиационного баланса увлажненной поверхности суши (R_y) от температурной характеристики теплого периода года (t) для территорий, высота которых не превышает 1500 м над уровнем моря:

$$R_y = 4,19 \cdot 10^4 (90 - 52e^{0,11(6-t)}) \text{ кДж/м}^2\text{год}, \quad (4)$$

где $t = \frac{\sum t_i}{12}$; $\sum t_i$ – сумма средних многолетних значений (норм) температуры воздуха за месяцы теплого периода года в пункте применения формулы (4). К теплому периоду здесь относятся месяцы с нормой температуры выше 0 °С. Далее величину t , для краткости, будем называть просто температурой. Была предложена также формула для расчета норм испаряемости (E_0), т. е. максимально возможного испарения с предельно увлажненной поверхности при данных метеорологических условиях

$$E_0 = 16,7(0,8 + 0,011t)(90 - 52e^{0,11(6-t)}) \text{ мм/год}. \quad (5)$$

Согласно (5), затраты тепла на испаряемость составляют от R_y долю, равную величине, стоящей в первых скобках $(0,8 + 0,011t)$. Коэффициент корреляции между R_y и t составляет 0,977. Применение формул (4) и (5) позволяет с вполне допустимыми погрешностями рассчитывать нормы испарения с поверхности суши по нормам t и атмосферных осадков для территорий с высотой не более 1500 м над уровнем моря [Постников, 2004].

Итак, формулы (3) и (5) относятся к предельно увлажненной поверхности, к которой, безусловно, принадлежит и водная поверхность. Поэтому если между нормами R_y и t существует тесная связь, то она должна существовать и между нормами R и t ввиду сказанного выше о малости величины P , а значит, может существовать и тесная связь между нормами испарения с водной поверхности за БП и температурой. Для проверки правильности этого предположения были собраны данные по рассчитанным величинам испарения с поверхности

озер и водохранилищ, расположенных на территориях России и некоторых сопредельных с ней государств, входивших в свое время в состав Советского Союза (табл. 1). Информация по испарению была заимствована из источников, указанных в примечаниях к табл. 1. В отдельных случаях значения испарения по одному и тому же объекту, приведенные в различных источниках, заметно разнятся. Поэтому требовалось решить, какие величины испарения по тому или иному объекту принять за действительные. При анализе либо бралось среднее значение по разным источникам, либо оставлялись те значения, которые автору представлялись более реальными. Принятые значения испарения (E_n) приводятся также в табл. 1. Надо отметить, что для озер приводятся годовые значения, а для водохранилищ – значения испарения за безледоставный период года. В табл. 1 указаны также метеостанции, по данным наблюдений которых определялись значения t .

На рис. 1 представлен график связи между принятыми значениями испарения и испаряемости, рассчитанной по формуле (5). Мы видим, что связь между этими переменными очень тесная, и так как испаряемость в данном случае зависит только от температуры, то должна существовать и не менее тесная связь между испарением с водной поверхностью и температурой.

Действительно, график связи между нормами испарения и температурой подтверждает это предположение (рис. 2).

На рис. 1 и 2 точки, за исключением двух, тесно группируются около некоторых прямых. Две заметно отклоняющиеся точки характеризуют испарение с озер Балхаш и Алаколь. Возможно, что эти отклонения объясняются тем, что преобладание светлых песчаных поверхностей на территориях, окружающих озера, обуславливает высокое альbedo, заметно большее, чем альbedo водной поверхности, и, как следствие, сравнительно низкие температуры воздуха в теплый период года. Кроме того, автор позволит себе высказать осторожное предположение, что принятые значения испарения по этим озерам являются несколько завышенными, особенно по оз. Алаколь. Далее обе эти точки были исключены из рассмотрения и по оставшейся выборке было получено уравнение связи:

$$E = 83t \text{ мм} \quad (6)$$

с коэффициентом корреляции между E и t , равным 0,975. Средняя квадратичная погрешность расчета по зависимым данным составляет 39 мм, а средняя относительная погрешность – 6 %. Уравнение связывает нормы E и t , однако, по-видимому, оно может применяться не только для оценок норм испарения за БП, но и для оценок испарения за такие же периоды конкретных лет, так как на начало и конец конкретного БП запасы тепла водоема примерно одинаковы, уравнение теплового баланса водоема – трехчленное и затраты тепла на испарения составляют основную долю радиационного баланса.

Таблица 1

Среднее многолетнее испарение с водных объектов, мм

Водохранилище, озеро, море	$t, ^\circ\text{C}$	Метеостанция	E_1	E_2	E_3	E_n	E	δE	$S, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Юшкозерское	4,5	Ухта, Юшкозеро			382	382	374	-8	2
Выгозерско-Ондское	4,9	Сегежа			467	467	407	60	13
Иваньковское	6,2	Тверь, Клин	522		513	518	515	3	1
Угличское	6,3	Углич, Рыбинск	576		554	565	523	-42	7
Рыбинское	6,1	Рыбинск, Брейгово, Устюжна, Череповец	519	418		519	506	-13	2
Горьковское	6,5	Городец, Юрьевец, Кострома	611	597	596	601	540	-61	10
Куйбышевское	7,4	Ульяновск, Самара, Казань, Чебоксары	646	580	616	614	614	0	0
Саратовское	8,3	Саратов, Сызрань, Хвалынский	668	650	656	658	689	31	5
Волгоградское	9,2	Саратов, Волгоград	732	743	753	743	764	21	3
Цимлянское	9,6	Калач-на-Дону, Цимлянск	1020		860	860	797	-63	7
Камское	5,9	Пермь, Соликамск	466	490		478	490	12	2
Воткинское	6,3	Воткинск, Оханск	481	430		481	523	42	9
Павловское	6,2	Караидель	504			504	515	11	2
Новосибирское	6,2	Новосибирск, Камень-на-Оби	656	336	534	508	515	7	1
Красноярское	6,2	Красноярск, Абакан	515	730		515	515	0	0
Братское	5,0	Братск, Распутино	384	391	411	395	415	20	5
Вилуйское	4,4	Нюрба, Сьюльдюкар	388	370		379	365	-14	4
Киевское	8,3	Киев, Чернобыль	696	675	644	672	689	17	3
Кременчугское	9,0	Кременчуг, Черкассы, Чигирин	787	670	671	709	747	38	6
Днепродзержинское	9,4	Днепродзержинск, Светловодск	730		656	730	780	50	7
Днепровское	9,6	Днепропетровск, Днепрогэс	813		712	762	797	35	5

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Каховское	10,2	Каховка, Запорожье	824	810	796	810	847	37	5
Дубоссарское	9,7	Сороки, Тирасполь	817		689	753	805	52	7
Бухгарминское	7,8	Самарка, Бухгарма	700	730		715	647	-68	10
Ладожское	5,6	Петрокрепость, Видлица, Приозерск, Соргавала	344	378		378	465	87	23
Онежское	5,1	Вознесенье, Петрозаводск, Василицин, Повенец	335	392		392	423	31	8
Чудско-Псковское	6,5	Псков, Гдов	560	520		540	540	0	0
Ильмень	6,3	Новгород, Коростынь	420	590		505	523	18	4
Лача	5,3	Каргополь	401			401	440	39	10
Воже	5,5	Чарозеро	480			480	456	-24	5
Таймыр	1,8	Таймырское озеро		197		197	149	-48	24
Байкал	4,6	Слюдянка, Нижнеангарск, Сарма, Усть-Баргузин	372	422		397	382	-15	4
Чаны	6,3	Квашино, Купино	491			491	523	33	7
Телецкое	6,5		360		468	468	540	72	15
Ханка	7,7	Турий Рог, Сангахеза	584	624		624	639	15	2
Нарочь	7,2	Вилейка		544		544	598	54	10
Каспийское	12,5	Астрахань, Гурьев, Форт Шевченко, Красноводск, Гасан-Кули, Махачкала, Баку, Астара	1020			1020	1038	18	2
Аральское	10,7	Муинак, Казалинск, Аральское море	960			960	888	-72	8
Балхаш	9,7	Балхаш, Чиганак, Алгазы	1020			1020			
Алаколь	9,5	Джунгария	1194			1194			

Примечания: E_1, E_2, E_3 – испарение, значения которого заимствованы соответственно в источниках [Викулина, 1979], [Рекомендации..., 1989], [Многолетние данные..., 1985]; E_n – принятые значения испарения; E – испарение, рассчитанное по формуле (6); δE – абсолютная погрешность оценки испарения, равная $|E - E_n|$; S – относительная погрешность оценки испарения, равная $100|\delta E|/E_n$.

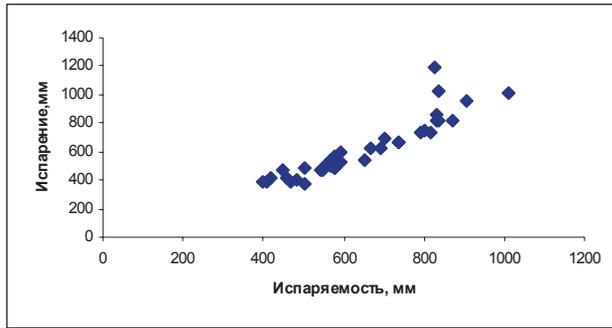


Рис. 1. Корреляция между испарением (E_n) и испаряемостью, рассчитанной по формуле (5)

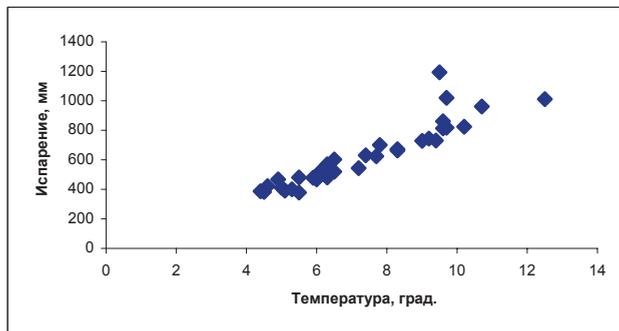


Рис. 2. Корреляция между испарением (E_n) и температурой

Расчеты показали, что нормы испарения с водной поверхности в среднем составляют 92 % от испаряемости, а затраты тепла на испарение – 81 % от радиационного баланса увлажненной поверхности.

Может возникнуть замечание, что в работе обобщены данные по испарению с водоемов без учета их глубины. Попробуем на это ответить. Роль глубины, безусловно, должна проявляться при формировании испарения за отдельные интервалы теплого периода, например, декады или месяцы. Действительно, по причине различного прогрева воды испарение с мелководного водоема в мае будет больше, а в сентябре, наоборот, меньше, чем с глубоководного. Однако у нас рассматривается только испарение в целом за БП, за который водоем получает и расходует одинаковое количество тепловой энергии, индикатором которой служит температура. Роль глубины наиболее значительно проявляется в участии при распределении во времени испарения внутри БП и становится мало заметной при сравнении испарения с водоемов с различной глубиной за весь БП. В пользу последнего утверждения приведем следующие аргументы. Уравнение (6) показывает, что учет только одной температуры уже позволяет оценивать испарение с достаточно высокой точностью, но количество предикторов можно увеличить, включив в их число, например, ту или иную характе-

ристку влажности воздуха. При этом, разумеется, погрешность расчета испарения по новому уравнению станет меньше, чем по уравнению (6), а сводный коэффициент корреляции, и без того значительный, станет еще больше. Может ли учет глубины в такой ситуации помочь заметно снизить погрешность расчета испарения? Ответ должен быть отрицательным.

Итак, предлагается расчет испарения в целом за БП конкретных лет производить по формуле (6). При необходимости получения оценок испарения за отдельные месяцы можно воспользоваться так называемым методом процентных отношений, по которому, например, определяются нормы месячного испарения с поверхности суши. Для его применения в нашем случае необходимо знать испарение за весь БП (E) и испарение в процентах от E за отдельные месяцы этого периода ($E\%$). Величина E здесь определяется по формуле (6).

Таблица 2

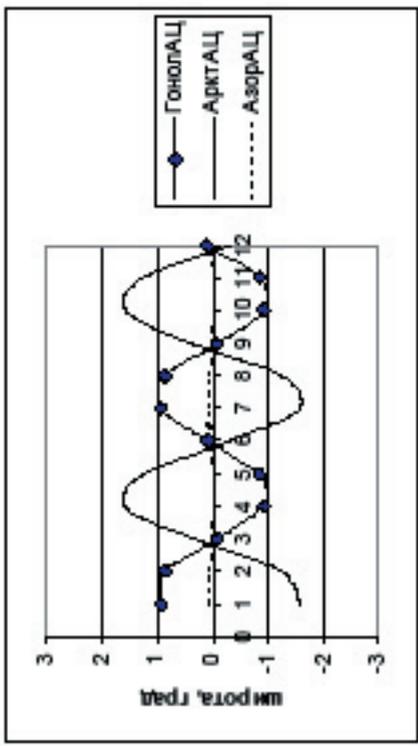
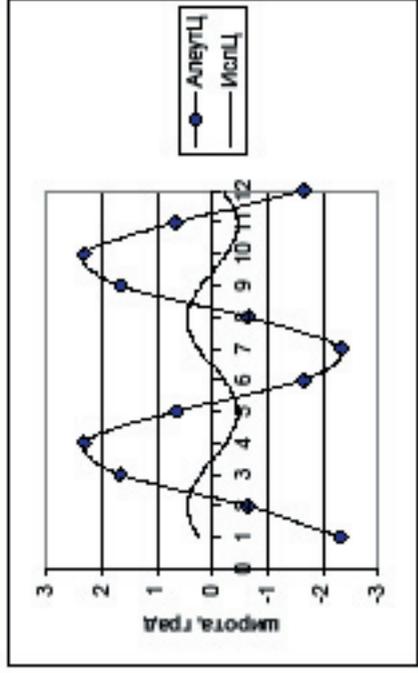
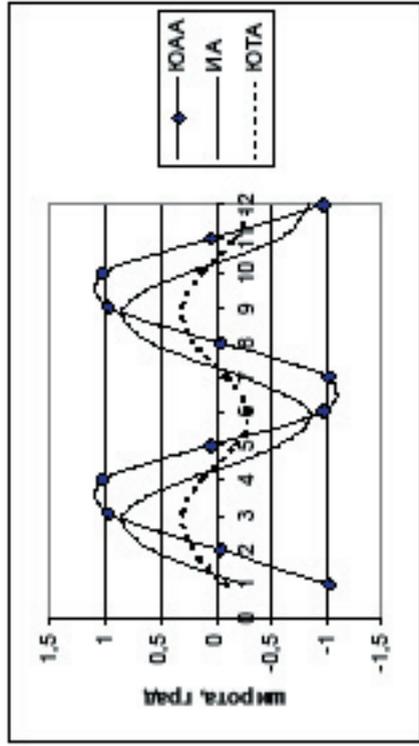
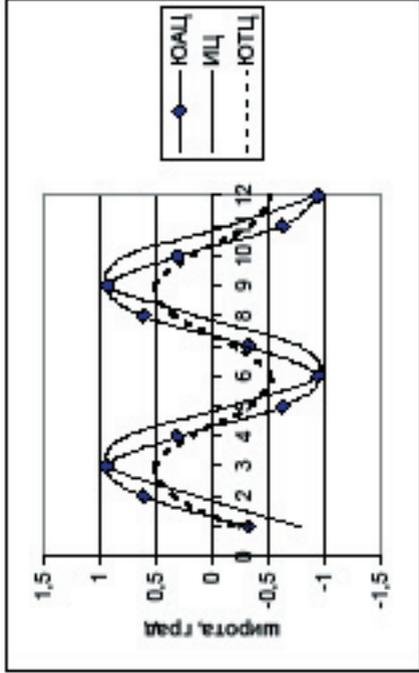
**Испарение с поверхности водохранилищ по месяцам
(в % от суммы за безледоставный период)**

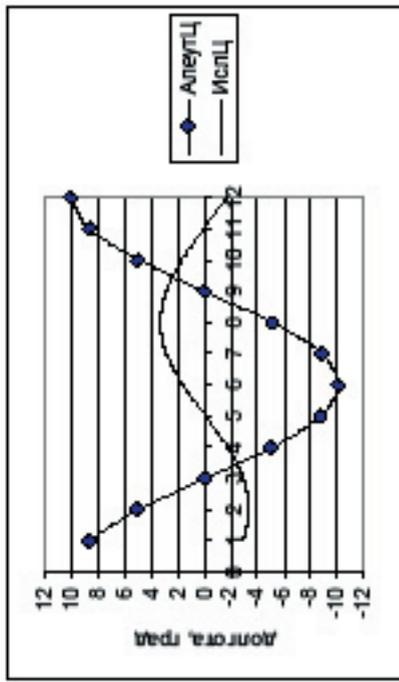
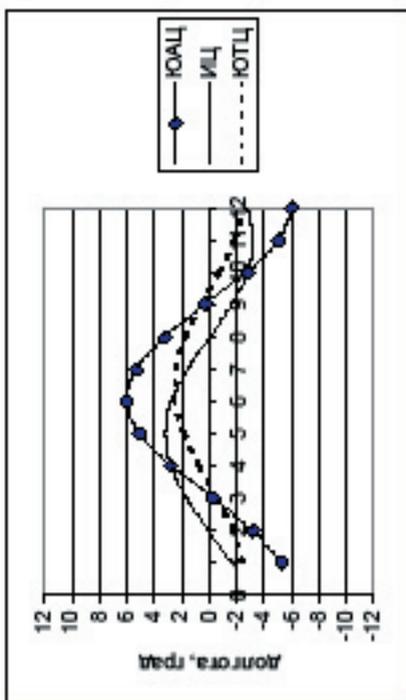
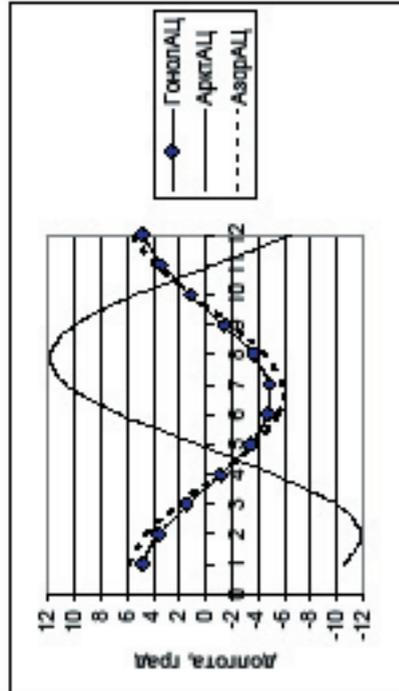
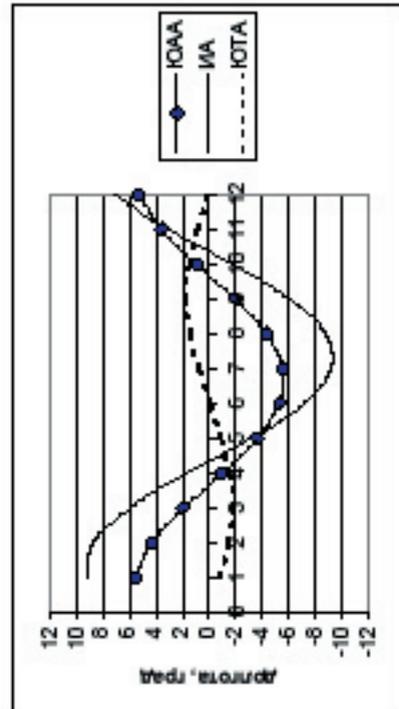
Водохранилище	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Верхнесвирское			8	8	13	18	18	18	17	
Иваньковское			14	21	22	20	14	8	1	
Угличское			12	19	23	21	15	9	1	
Рыбинское			8	20	23	23	15	7	5	
Горьковское			8	18	21	23	16	11	3	
Павловское		3	11	16	21	19	14	13	3	
Камское		3	6	14	23	23	16	11	4	
Воткинское		2	5	15	21	22	19	14	2	
Куйбышевское		2	11	16	20	20	16	11	4	
Саратовское		1	8	12	20	22	20	12	5	
Волгоградское		1	3	12	20	24	20	14	6	
Цимлянское		4	10	15	18	20	17	10	6	
Новосибирское			8	17	22	24	17	12		
Братское		6	7	9	15	18	18	16	11	
Вилуйское			5	11	26	25	18	15		
Киевское		5	16	19	21	18	14	6	1	
Кременчугское		4	12	18	20	20	15	8	3	
Днепродзержинское		2	11	18	21	21	17	8	2	
Днепровское		2	11	16	22	20	15	8	4	2
Каховское	1	3	9	15	20	21	16	9	4	2
Дубоссарское	2	10	11	15	18	18	15	10	1	

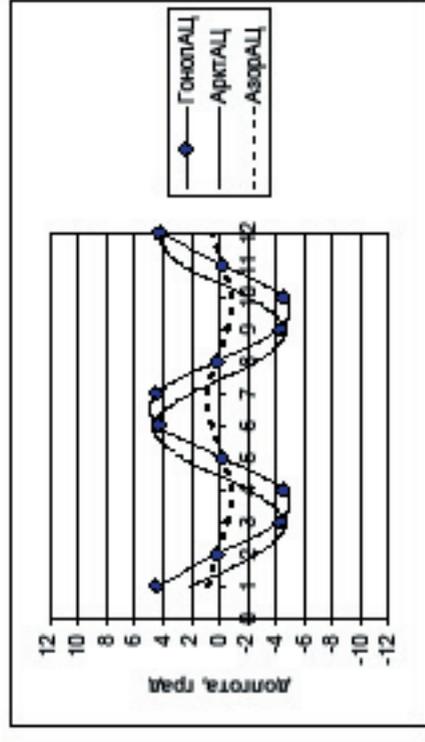
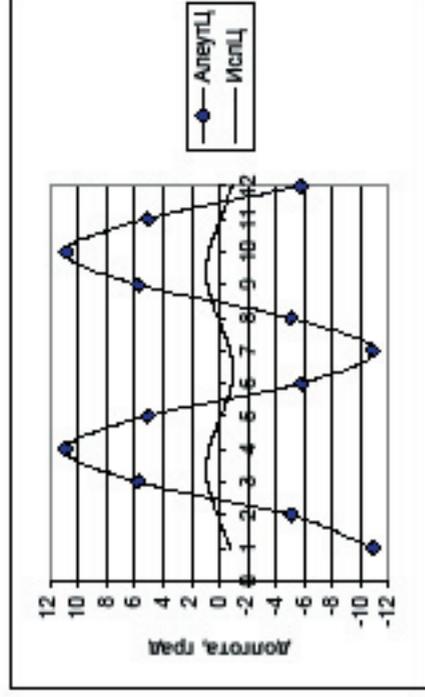
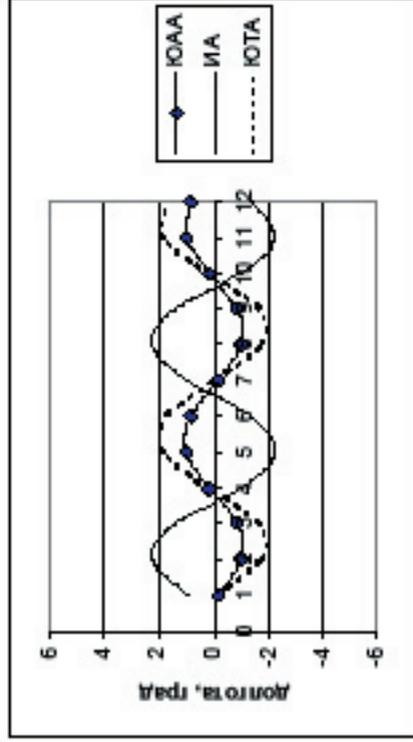
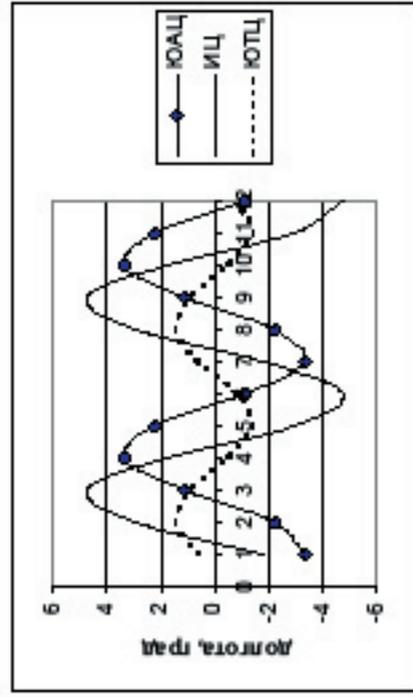
В качестве примера в табл. 2 для ряда водохранилищ приведены значения $E\%$, полученные автором на основе данных по среднему многолетнему месячному испарению с этих водоемов, приведенных в работе [Викулина, 1979]. Значения $E\%$ с поверхности малых водоемов можно найти в [Указания..., 1969].

Литература

1. *Викулина З.А.* Водный баланс озер и водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат, 1979.
2. *Кириллова Т.В.* Радиационный баланс озер и водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат, 1970.
3. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1985.
4. *Постников А.Н.* Формулы для расчета среднего годового испарения с поверхности суши и радиационный баланс увлажненной поверхности // Проблемы современной гидрологии. Сборник научных трудов гидрологического факультета. – СПб., 2004, с. 143-153.
5. *Постников А.Н.* Метод расчета испарения с почвы в различных природных зонах // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2009, № 10, с. 21-31.
6. Рекомендации по расчетам водного баланса крупных озер и водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат, 1989.
7. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.
8. *Чеботарев А.И.* Гидрологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1978.







[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

