

ПРИКЛАДНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

М. П. ТИМОФЕЕВ

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ
ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ОЗЕРА СЕВАН

Уравнение теплового баланса для деятельного слоя водоема можно записать в следующем виде:

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

где: $R = S(1 - A) - (E_n - E_a)$ — радиационный баланс,

LE — затраты тепла, связанные с процессом испарения с водной поверхности,

$B = c'p' \int_0^n \frac{\partial T}{\partial t} dz$ — изменение теплосодержания воды,

$c'p'$ — объемная теплоемкость воды,

P — величина теплообмена между водой и атмосферой.

Для определения всех составляющих теплового баланса необходимо знание трех величин уравнения (1). Величина R характеризует энергетическую сторону гидрометеорологических процессов, в то время как тепловой режим водной массы описывается значением B .

Остановимся, прежде всего, на способах определения величины испарения. С принципиальной стороны существующие способы определения испарения с водной поверхности могут быть отнесены к методу теплового баланса, к методу турбулентной диффузии и к методу испарителей.

Первый и второй методы мы рассмотрим ниже, а сейчас кратко охарактеризуем третий метод.

Испарители (наземные и пловучие) употребляются для определения величины испарения с поверхности водоема на основании данных о величине испарения с поверхности испарителя. В этом случае необходимы данные о величинах m_n редуцированных множителей, определение которых во многих случаях связано с такими же трудностями, как и определение истинной величины испарения.

Второе направление использования испарителей — установление зависимости величины испарения от метеорологических факторов. Таким путем обосновываются эмпирические формулы для расчета величины испарения. Как уже отмечено [7], это направление использования испарителей не всегда позволяет получать универсальные зависимости.

В дополнение к уже известным фактам, следует обратить внимание на следующие обстоятельства.

Как показывает опыт, с помощью испарителей не всегда возможно установить истинную зависимость испарения от некоторых факторов. Например, влияние размеров водной поверхности на процесс испарения по опытам с испарителями, по-видимому не всегда правильно отражает природные условия. Некоторые исследователи [3] считают, что показания наземных испарителей площадью 20 м² или несколько более (глубиной 1,5–2 м) характеризуют условия испарения с небольших водоемов (площадью 100 га и глубиной 5–6 м). Рассмотрим уравнение теплового баланса для испарительного бассейна:

$$R_B = LE_B + B_B + P_B. \quad (2)$$

Для того, чтобы величина E_B равнялась испарению с водоема, необходимо выполнение условия:

$$\begin{aligned} L\Delta E = L(E - E_B) &= (R - R_B) + (P_B - P) + (B_B - B) = \\ &= \Delta R + \Delta P + \Delta B = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Совершенно очевидно, что только в исключительных случаях возможно равенство $\Delta E = 0$.

Рассмотрим более подробно величину $L\Delta E$.

Легко показать, что для $L\Delta E$ можно получить следующее более подробное выражение:

$$L\Delta E = S(A' - A) + \alpha(T_n' - T_n) + \Delta B, \quad (4)$$

где:

S — суммарная радиация, принимаемая одинаковой для бассейна и водоема,

A' — альбедо испарительного бассейна,

A — „ „ водоема,

$$\alpha = 4\sigma T_0^3 + c_p \rho.$$

T_n' , T_n — температуры поверхности воды в бассейне и водоеме.

Если рассматривать величину испарения для длительных периодов (например летний сезон), то величина $\Delta B \approx 0$, и тогда

$$L\Delta E = S(A' - A) + \alpha(T_n' - T_n). \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) показывают, что значение ΔE зависит как от условий погоды, так и от географических условий. Таким образом, даже для небольших водоемов в силу соотношений (4), (5), показания испарительного бассейна не всегда характеризуют условия испарения водоема.

Следует отметить, что на основании формул (5) — для летнего (или годового) периода и формулы (4) — для более короткого периода времени и некоторых дополнительных наблюдений можно оценить величину ΔE .

В частности, если испарительный бассейн установлен недалеко

от водоема, то простейшие актинометрические (точнее пиранометрические) наблюдения на водоеме и над бассейном позволят определить величину ΔE , а тем самым и E , т. е. истинную величину испарения с поверхности водоема. Нам представляется, что указанный путь использования испарительных бассейнов может в сильной степени расширить область правильной интерпретации их показаний.

Как известно, величина испарения с поверхности озера Севан определялась с помощью эмпирических формул В. К. Давыдова [2], полученных им на основании данных испарителей. Позже на озере был установлен испарительный бассейн площадью 20 м^2 . Показания испарительного бассейна, установленного на озере Севан, за короткие интервалы времени (сутки и декады) могут отличаться от истинной величины испарения с поверхности озера на 30—40% и более [6].

Из вышеизложенного краткого анализа можно сделать вывод о том, что прямое использование испарителей и эмпирических формул, для определения величины испарения с поверхности водоемов, может быть связано с заметными погрешностями. Поэтому для определения величины испарения с поверхности озера Севан мы рекомендуем диффузионный метод и метод теплового баланса.

Скорость испарения может быть определена из уравнения:

$$u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (6)$$

или учитывая уравнение неразрывности,

$$\frac{\partial(uq)}{\partial x} + \frac{\partial(wq)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial q}{\partial z}. \quad (7)$$

Здесь u , w — горизонтальная и вертикальная составляющие скорости воздуха,

q — влажность воздуха,

K — коэффициент обмена.

Уравнения (6) и (7) не имеют простого для практического использования решения. Однако на основании этих уравнений сравнительно просто можно оценить влияние на скорость испарения, например, вертикальных токов. Именно, если обозначить через E_w — величину испарения, зависящую от вертикальных токов, то из уравнения (6) легко получаем

$$E_w = -\bar{\rho w}(q_n - q_z), \quad (8)$$

где \bar{w} — среднее значение вертикальных токов в слое $0 - z$. На основании шаропилотных наблюдений, поставленных на озере Севан ГГО, ВЭНИ и УГМС Армянской ССР и используя уравнения неразрывности, И. И. Честная установила, что если $z = 1 \text{ м}$, то \bar{w} в среднем имеет величину $\bar{w} = 0,01 \text{ см/сек}$. Если учесть это значение \bar{w} , то для E_w получаем значение $E_w = 7 \cdot 10^{-4} (e_n - e_z) \frac{\text{мм}}{\text{сутки}}$. Если при-

нять во внимание, что характерное значение $e_n - e_z = 10$ мб, то

$$E_w = 7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{мм}}{\text{сутки}} \approx 10^{-2} \frac{\text{мм}}{\text{сутки}},$$

т. е. примерно на 2 порядка менее характерного значения испарения с водной поверхности. Поэтому величина испарения может быть рассчитана по формуле:

$$E = -\rho K \frac{\partial q}{\partial z} + \rho \int_0^z u \frac{\partial q}{\partial x} dz. \quad (9)$$

Если воспользоваться известным решением [5] уравнения диффузии, то последняя формула может быть записана в несколько другой форме:

$$\frac{E}{\rho \frac{k_1}{z_1} (q_n - q_z)} = \alpha_k + \alpha_x, \quad (10)$$

где безразмерные величины α_k и α_x , характеризующие влияние на величину скорости испарения вертикальной диффузии водяного пара и адвекции, имеют следующие значения:

$$\alpha_k = \frac{e^{-\frac{1}{2L}}}{2^p (1-2p) \Gamma(p) L^p \left[1 - F\left(\frac{1}{2}, 2p\right) \right]}, \quad (11)$$

$$\alpha_x = \frac{1 - e^{-\frac{1}{2L}}}{2^p (1-2p) \Gamma(p) L^p \left[1 - F\left(\frac{1}{2}, 2p\right) \right]}. \quad (12)$$

Величина $L = \frac{\frac{k_1}{u_1}}{2(1-2p)^2 z_1^{\frac{1-4p}{1-2p}}} \cdot \frac{x}{z^{\frac{1-2p}{1-2p}}}$ для данной высоты зависит от размеров водоема (x) и характеристик турбулентного обмена $\left(\frac{k_1}{u_1}\right)$.

Экспериментальные исследования, проведенные на озере Севан в 1956–57 гг. позволили определить значение параметров $\frac{k_1}{u_1}$ и p .

Изменение α_k и α_x в зависимости от L показано на рис. 1. Как видно из рисунка при $L \geq 10$ (что для условий Севана соответствует $x \geq 1$ км), α_k примерно на два порядка больше значения α_x . Поэтому, учитывая характерные размеры озера Севан, получаем следующую формулу для определения испарения на основании диффузионного метода

$$E = \rho a u_1 (q_n - q_1) = \rho b u_1 (e_n - e_1). \quad (13)$$

При этом

$$a = \frac{k_1}{u_1} \frac{P}{4^p (1-2p) [\Gamma(1+p)]^2 z_1}$$

Если E выразить в $\frac{\text{мм}}{\text{сутки}}$, а u_1, e_n, e_1 в общепринятых единицах,

тогда для E получаем следующее выражение:

$$E = 0.136 u_1 (e_n - e_1) \frac{\text{мм}}{\text{сутки}} \quad (14)$$

Таким образом, для определения величины E необходимы данные о скорости ветра u_1 (на высоте над водной поверхностью $z_1 = 1 \text{ м}$), температуре поверхности воды (для определения величины e_n) и влажности воздуха.

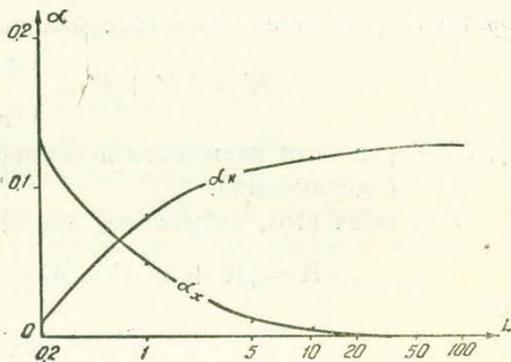


Рис. 1.

Как показали исследования Т. А. Огневой, указанные величины можно сравнительно надежно определить с помощью обычных наблюдений, ведущихся на озере и специально поставленных простейших наблюдений на береговых мостках. Указанная система наблюдений позволяет определять величину E за месячный интервал времени. С принципиальной стороны диффузионный метод позволяет определять величину E и за более короткие интервалы времени; ограничением в данном случае являются периоды, для которых определяются величины u_1, e_n, e_1 .

Для более надежного определения величины E и контроля расчетов диффузионным методом следует вычислять ее также методом теплового баланса.

Учитывая метеорологические особенности озера Севан, целесообразно последний использовать следующим образом.

Важнейшая величина теплового баланса — R , должна измеряться двумя способами:

1. На основании измерений радиационного баланса деятельного слоя озера с помощью балансомера, установленного над водой на м/с „Остров“. Показания балансомера записываются с помощью гальванографа. Эти измерения следует считать контрольными.

2. Определение радиационного баланса деятельного слоя воды на основании данных о радиационном балансе деятельного слоя суши (вблизи водоема) и некоторых наблюдений над водоемом. Этот способ, как известно [5], позволяет определить величину R с помощью следующего соотношения:

$$R = R' + S(A' - A) + 4\sigma T_0^3 (T_n' - T_n) = R' + S(A' + A) + 4\sigma T_0^3 (T_n' - T_n) - 4\sigma T_0^3 (T_n - T_n'). \quad (15)$$

Здесь R' — радиационный баланс суши,

A' , A — альбедо суши и водоема,

T_n' , T_n — температура поверхности суши и воды, которые в первом приближении получаются на основании стандартных наблюдений.

Кроме того, для определения величины $(T_n' - T')$, можно воспользоваться уравнением теплового баланса для суши:

$$R' = LE' + P' = \left(\frac{L}{c_p} \frac{\Delta q}{\Delta T} + 1 \right) P', \quad (16)$$

Δq , ΔT — разности влажности и температуры воздуха на 2-х уровнях (одинаковых).

Учитывая (16), выражение для R можно переписать:

$$R = \gamma R' + S(A' - A) - 4\sigma T_0^3(T_n' - T'), \quad (17)$$

где

$$\gamma = 1 + \frac{4\sigma T_0^3}{c_p \rho D' \left(\frac{L}{c_p} \frac{\Delta q}{\Delta T} + 1 \right)}. \quad (18)$$

Можно предполагать, что для летних месяцев из-за малых величин испарения с суши, выражение (18) допускает следующее упрощение:

$$\gamma = 1 + \frac{4\sigma T_0^3}{c_p \rho D'}. \quad (19)$$

Это допущение нуждается в проверке, которую легко осуществить с помощью простейших градиентных наблюдений на нескольких прибрежных станциях озера Севан. Величина D' для средних условий хорошо известна [1]. Поэтому, определение радиационного баланса водоема, кроме измерений радиационного баланса суши, потребует эпизодических наблюдений за альбедо воды и суши и температурой поверхности воды. Такие наблюдения уже проводятся на м/с „Остров“, Мартуни и сравнительно просто могут быть поставлены на м/с Норадуз.

Если, как обычно, величину B определить на основании гидрологических измерений на озере, тогда испарение с поверхности озера на основании уравнения теплового баланса может быть определено по формуле:

$$E = \frac{(R - B)(q_n - q)}{L(q_n - q) + C_p(T_n - T)}. \quad (20)$$

Таким образом, для определения испарения по этому методу кроме величины $(q_n - q)$ или $(e_n - e)$, необходимы данные о температуре воздуха, которые также должны получаться по наблюдениям с помощью мостков. Следует отметить, что основное затруднение при практическом применении формулы (20) связано главным образом с расчетом величины B . Обычные гидрологические измерения на озерах, которые проводятся и на озере Севан, очень часто не позволяют сколько-нибудь надежно рассчитать величину B не только за такие

промежутки времени как сутки, декада, но даже и за месячный интервал. Для надежного расчета величины B , по-видимому, необходимы очень подробные и многочисленные измерения вертикальных профилей температуры воды в озере, что практически трудно осуществить.

Поэтому ниже мы попытаемся указать косвенный (точнее метеорологический) способ определения величины B .

Уравнение (1) можно переписать

$$R = L_{раи} (q_n - q) + C_{рраи} (T_n - T). \quad (21)$$

Здесь величина „ a “, как показано экспериментальными исследованиями на озере Севан [6], определяется свойствами водной поверхности.

С другой стороны за сравнительно длительный промежуток времени (например, за естественный годовой цикл) величина B является малой, т. е. для такого периода будет действительно уравнение:

$$\bar{R} = L_{раи} (\bar{q}_n - \bar{q}) + C_{рраи} (\bar{T}_n - \bar{T}) + \Delta B, \quad (22)$$

где ΔB — малая величина, равная нулю для правильного годового естественного периода водоема и отличная от нуля для аномальных (в погодном отношении) периодов; \bar{u} , $(\bar{q}_n - \bar{q})$, $(\bar{T}_n - \bar{T})$ — средние скорости ветра, разности влажности и температуры воздуха для всего периода.

Используя уравнения (21) и (22), можно получить следующее соотношение для определения величины B .

$$B = R - \frac{\bar{u}}{u} \cdot \frac{(T_{эн} - T_э)}{(T_{эн} - T_э)} \bar{R}, \quad (23)$$

при этом мы приняли $\Delta B \approx 0$ и ввели обозначение для эквивалентной температуры $T_э = T + \frac{L}{C_p} q$.

В этом случае для величины скорости испарения, очевидно получим следующую формулу:

$$E = \frac{\bar{R}}{C_p u (T_{эн} - T_э)} u (q_n - q). \quad (24)$$

Как показывают формулы (23), (24) определение скорости испарения с озера Севан по изложенному способу свелось к измерению в основном метеорологических величин.

В заключении еще раз отметим, что определение величины испарения с озера Севан, изложенными выше двумя методами, позволит получить наиболее надежные данные о важнейшей составляющей водного баланса озера. Кроме того, дополнительные систематические наблюдения на мостках и на некоторых метеорологических станциях, сейчас необходимые для определения величины испарения, позволят получить новые важные данные о метеорологическом режиме озера.

Водно-энергетический институт

АН Армянской ССР

Поступило 20.VI.58

ՍԵՎԱՆԱ ԼՃԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀԱՇՎԵԿՇՈՒ ԲԱՂԱԴՐԻՉՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ
ՄԵԹՈԴԻԿԱՅԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո ս ո մ

Հողվածում բերվում է ջերմային հաշվեկշռի բաղադրիչների որոշման հարցի լուծումը Սեանա լճի պայմաններում:

Հայտնի է, որ Սեանա լճի ջրային հաշվեկշռի համար ամենակարևոր բաղադրիչներից մեկը գոլորշիացման քանակն է: Վերջինիս վրա ծախսված ջերմային էներգիան մանրամասն է ջերմային հաշվեկշռի (1) հավասարման մեջ: Հողվածում բերվում է գոլորշիացման սրտման երևք տարբեր մեթոդների համեմատական անալիզը՝ 1) ջերմային հաշվեկշռի, 2) տուրբուլենտ դիֆուզիայի և 3) գոլորշիացնողների մեթոդները:

Տրվում է ուղղաձիգ օդային հոսանքների և ազվեկցիայի ազդեցությունը գոլորշիացման քանակի վրա:

Ճառագայթային հաշվեկշիռը որոշվում է երկու եղանակով՝ անմիջական չափումների միջոցով ջրի մակերևույթի վրա և հաշիվների միջոցով, ելնելով ցամաքի վրա կատարած դիտումներից: Վերջինիս համար առաջարկվում է (15) բանաձևը:

Մեծ գծավորություն է ներկայացնում ջրում ջերմափոխանակությունը որոշելու հարցը: Վերջինս սովորաբար որոշվում է երկու եղանակով՝ ջերմի ջերմապարտանակության փոփոխությունների հաշվման և կամ տուրբուլենտ ջերմափոխանակության հաշվման միջոցով, ընդ որում հարկավոր է լինում ունենալ ջրի ջերմաստիճանի բազմաթիվ պրոֆիլներ և տուրբուլենտականության գործակիցը:

Հողվածում առաջարկվում է (23) բանաձևը, որի միջոցով կարելի է հաշվել ջերմափոխանակությունը լճի ջրում, իսկ որպես սովյալներ օգտագործվում են օգերևույթարանական սովորական դիտումների արդյունքները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бройдо А. Г. Некоторые результаты исследования интегрального коэффициента турбулентного перемешивания. Журн. „Метеорология и Гидрология“, № 9, 1957.
2. Давыдов В. К. Испарение с поверхности озера Севан. Материалы по исследованию оз. Севан, часть II, вып. 2, 1935.
3. Зайков Б. Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР. Тр. ГГИ, вып. 21, 1949.
4. Тимофеев М. П. Испарение с водной поверхности в турбулентной атмосфере. Ученые зап. ЛГУ, серия физ., № 7, 1949.
5. Тимофеев М. П. О метеорологическом эффекте орошения. Журн. „Метеорология и Гидрология“, № 11, 1952.
6. Тимофеев М. П. Об исследовании метеорологического режима озера Севан. Известия АН Армянской ССР, серия техн. наук, т. X, № 4, 1958.
7. Тимофеев М. П. Тепловой баланс водоемов и методы определения испарения. Сб. „Соврем. метеорология приземного слоя воздуха. Гидрометеоздат, 1958.