

УДК 551.5

DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.4782556>

Мамедов А.С., Гасанова Н.И., Ахмедова В.Р.

## РАСЧЕТ ИСПАРЕНИЯ ПО УРАВНЕНИЮ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

*В статье анализируются способы изучения испарения. Как известно, погрешности при измерении испарения ставят вопрос о ее теоретическом расчете. Для этого используется в один из известных методов расчета – уравнение теплового баланса, а для дальнейшего упрощения решения этой задачи используют неопределенные индексы, учитывающие влияние ветра и влажности. Математическое выражение, предложенное Йенсеном и Хейзом для Калифорнии, с рассчитанными новыми коэффициентами, применено для станции Шамкир. Расчеты производятся для разных сезонов по выбранным характерным дням. При определении коэффициентов значение коэффициента корреляции между рядами равно  $r = 0,86$ .*

**Ключевые слова:** возможное испарение, испарение, индексы, корреляция, радиация; коэффициенты.

Постановка проблемы. В результате происходящих климатических изменений в бассейнах рек изменяются условия формирования стока, что приводит к существенной трансформации его распределения внутри года. Анализ уравнения водного баланса речных водосборов за многолетний период позволяет сделать вывод, что средний многолетний сток зависит от климатических факторов, а потом уже от всех других природных факторов, оказывающих влияние на впитывание воды в почву и испарение. Испарение с поверхности почвы и водной поверхности является важной составной частью водного режима суши. Взаимодействие двух процессов, инфильтрации влаги в почву и ее потерь на испарение, определяют соотношение поверхностной и подземной составляющих речного стока. В то же время величина испарения является косвенным показателем степени увлажненности территории.

В практике, в основном, требуется расчеты суммарного испарения с речных бассейнов. Но чаще всего поверхность бассейна неоднородная и их учет затруднителен. Поэтому в практических целях для расчета испарение с водной поверхности и с суши рекомендуют различные методы: испарители и лизиметры; расчеты по связям между элементам водного и теплового баланса, водный баланс; тепловой баланс; турбулентная диффузия; эмпирические формулы, комплексный метод и т. д.

© Мамедов А.С., Гасанова Н.И., Ахмедова В.Р., 2021.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
Article Info: Received: March 30, 2021;  
Final revision: April 20, 2021; Accepted: April 15, 2021.

Известно, что расчет испарения для неоднородных поверхностей сложнее, чем для однородной поверхности. Поэтому для положительного решения этой задачи, т.е. для неоднородных сухих поверхностей, рассмотрим общий вид уравнения теплового баланса в следующем виде:

$$R_n - L_e E - H + L_p F_p - C + A_p = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (1)$$

Здесь тепловой поток в глубину почвы считается положительным, а в обратном направлении – отрицательным.  $R_n$  – это радиационный баланс, входящий в формулу (1);  $L_e$  – скрытое тепло парообразования;  $E$  – испарение;  $H$  – турбулентный тепловой поток от поверхности к атмосфере;  $L_p$  – коэффициент термического эквивалента, поглощаемый диоксидом углерода;  $F_p$  – поток углекислого газа;  $G$  – тепловой поток на почву;  $\frac{\partial w}{\partial t}$  – скорость изменения теплоемкости с единицы площади. Последняя составляющая – поглощаемое тепло, расходуемое для таяния, накапливается на поверхности льда или снега.  $L_e$  заменяется скрытой теплотой, выделяющейся при сублимации, и может меняться в зависимости от свойств поверхности [2, 3].

Для расчета радиационного баланса используется следующее выражение:

$$R_n = R_s(1 - \alpha_s) + \varepsilon_s R_{id} - R_{Lu} \quad (2)$$

здесь  $R_s$  – коротковолновая суммарная радиация;  $\alpha_s$  – альbedo поверхности;  $R_{id}$  – нисходящий вниз длинноволновой поток радиации;  $\varepsilon_s$  – поглощающий коэффициент поверхности;  $R_{Lu}$  – восходящий верх длинноволновой поток радиации;

Конечно, сейчас есть приборы, которые достаточно точны для измерения радиационного баланса. Однако иногда бывает необходимо рассчитать значение радиационного баланса вне пунктов наблюдения. В таких случаях его накопление рассчитывается теоретически.

Ангстрем для нахождения суммарной радиации считает приемлемым выполнить расчеты по следующей формуле:

$$R_s = R_{se} \left[ a + (1 - a) \frac{n}{N} \right], \quad (3)$$

Здесь  $R_{se}$  – среднесуточный суммарный поток радиации в ясных погодных условиях;  $\frac{n}{N}$  – относительная продолжительность солнечного сияния ( $n$  – продолжительность солнечного сияния,  $N$  – продолжительность светового дня);  $a$  – постоянный коэффициент, зависящий от широты [2, 4].

Уменьшение массы водяного пара в зависимости от высоты указывает на то, что водяной пар переносится вверх. В зависимости от высоты скорость концентрации пара связана с изменением плотности.

Поскольку наша цель – вычислить скорость испарения  $E$ , то уравнение баланса (1) можно привести к следующему виду:

$$L_e E + H = Q_n \quad (4)$$

Здесь  $Q_n$  – принимается как суммарный тепловой поток. Уравнение (2) в гидрологии

$$E + H_e = Q_{ne} \quad (5)$$

можно принять как:  $Q_{ne} = Q_n / L_e$ ;  $H_e = H / L_e$

Следует отметить, что в большинстве случаев  $L_p F_p$ ,  $A_h$  и  $\frac{\partial w}{\partial t}$  не учитываются, поскольку они оказывают очень небольшое влияние на сухие поверхности, тогда уравнение (1) можно привести к этому виду:

$$Q_n = R_n - G. \quad (6)$$

Впервые Хомза (1897) и Шмидт (1915) использовали уравнение теплового баланса для расчета испарения с поверхности океана. Только 10 лет спустя, в 1926 году, Боуэн использовал следующую форму уравнения баланса:

$$B_0 = C_p(T_1 - T_2) / L_e (q_1 - q_2) \quad (7)$$

Отсюда получаем следующий вид уравнения баланса, принятого для расчета испарения:

$$E = Q_{ne} / (1 + B_0) \quad (8)$$

Здесь значения  $T_1$  и  $q_1$  – это значения  $T_s$  и  $q_s$  на поверхности.

В 1963 году Йенсен и Хейз, основываясь на уравнении баланса, предложили более простое выражение для расчета испарения:

$$E = (a * T_a + b) * R_{ce} \quad (9)$$

Здесь при проверках, проведенных для территории Калифорнии, при значениях  $a = 0.025^\circ C^{-1}$  и  $b = 0,078$  получили значения коэффициента корреляции  $r = 0,97$  [2, 6].

Исходя из нашего выражения (9), коэффициенты, рассчитанные для пункта Шамкир, получились равными  $a = 1,12$ ;  $b = 1,10$ ; (в данном случае значение коэффициента корреляции  $r = 0,86$ ). Основываясь на выражение (9), в наших расчетах при выборе коэффициентов для некоторых пунктов Малого Кавказа, использовались данные «Атласа теплового баланса Азербайджана» Э.М. Шихлинского [1, 5].

Среднегодовой максимум испарения в стране колеблется в пределах от 1200-1400 мм в Нахичевани и до 1000-1200 мм на Кура-Аразской низменности. Среднегодовое количество возможного испарения на других территориях колеблется в пределах 800-1000 мм. В горных районах испарение уменьшается с увеличением высоты. В среднегорных районах возможное испарение снижается до 300-400 мм.

В таблице 1 показаны характерные дни разных сезонов в Шамкирском регионе, и за эти дни впервые рассчитаны значения испарения по уравнению теплового баланса. Как известно, погрешность измерения испарения в пунктах наблюдения больше чем при теоретических расчетах. Поэтому в нашем

следующем исследовании мы планируем рассчитать испарение в других регионах нашей страны.

Таблица 1

Среднесуточное испарение в Шамкире за характерные дни 2010 г. (мм)

день/месяц	01/II	03/II	04/II	05/II	06/II	07/II	10/II	12/II	13/II
Е	26.7	18	18.3	10.7	-0.05	1.1	3.2	2.6	-0.3
Т	8.2	5.2	5.3	2.7	-1	-0.6	0.1	-0.1	-1.1
день/месяц	15/II	02/III	05/III	06/III	14/III	18/III	24/ III	26/ III	27/ III
Е	4.6	28.5	21.8	36.1	29.9	19.2	34.9	37.8	26.4
Т	0.6	8.8	6.5	11.4	9.3	5.6	11	12	8.1
день/месяц	29/ III	30/ III	01/VI	03/ VI	04/ VI	06/ VI	07/ VI	09/ VI	10/ VI
Е	31.7	41.3	68.9	75.4	83.2	80.6	76.2	78.6	75.7
Т	9.9	13.2	22	24.9	24.6	26.7	25.2	26	25.0
день/месяц	14/VI	26/VI	30/ VI	05/VII	12/VII	21/VII	22/VIII	23/VIII	29/VIII
Е	87.0	75.1	80.0	84.9	95.8	88.2	74.5	61.1	67.5
Т	28.9	24.8	26.5	29.9	31.9	29.3	24.6	20.0	22.2
день/месяц	03/IX	13/IX	19/IX	28/IX	29/IX	31/IX	2/X	14/X	20/X
Е	84.7	66.6	65.2	62.8	44.2	37.5	60.8	51.2	52.4
Т	28.1	21.9	21.4	20.6	14.2	11.9	19.9	16.6	17.0
день/месяц	01/XI	05/ XI	14/ XI	16/ XI	20/ XI	22/ XI	26/ XI	29/ XI	30/ XI
Е	22.4	35.8	29.9	30.5	29.6	29.9	36.1	36.6	29.1
Т	6.7	31.3	9.3	9.5	9.2	9.3	11.4	11.6	9.0
день/месяц	02/XII	08/XII	14/XII	20/XII	22/XII	27/XII	28/XII	29/XII	31/XII
Е	30.2	33.1	27.0	22.1	14.5	10.7	15.1	18.3	19.5
Т	9.4	10.4	8.3	6.6	4.0	2.7	4.2	5.3	5.7

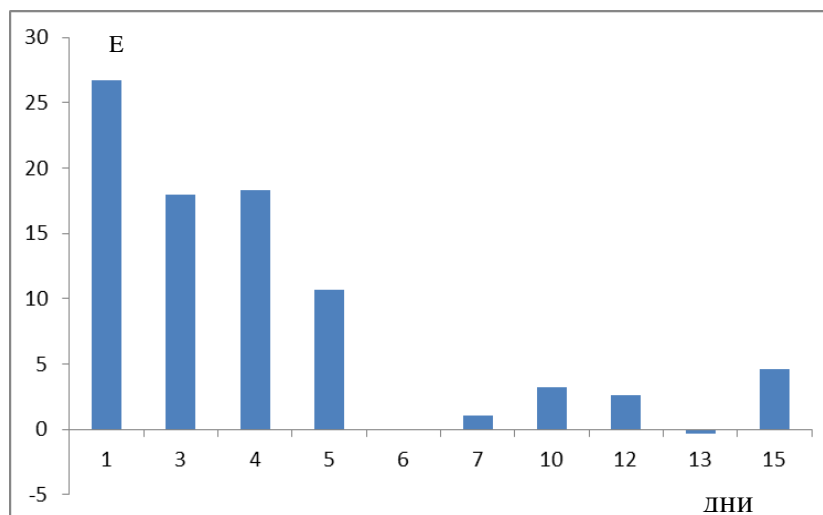


Рис. 1. Распределение рассчитанных значений испарения (мм) в пункте Шамкир за февраль месяц 2010 г.

Таким образом, согласно анализу данных графиков, можно сказать, что значения испарения в зимние месяцы в основном уменьшаются в 1-ой и 2-ой декаде, и постепенно увеличиваются в 3-ей декаде. Причины этого, конечно, можно объяснить нестабильными погодными условиями (рис. 1 и рис. 5). Несмотря на то, что посуточное распределение испарения значительно колеблется

весной, распределение испарения летом сохраняет свою стабильность (рис. 2, рис. 3). Осенью, как и зимой, сохраняется тенденция к снижению (рис. 4).

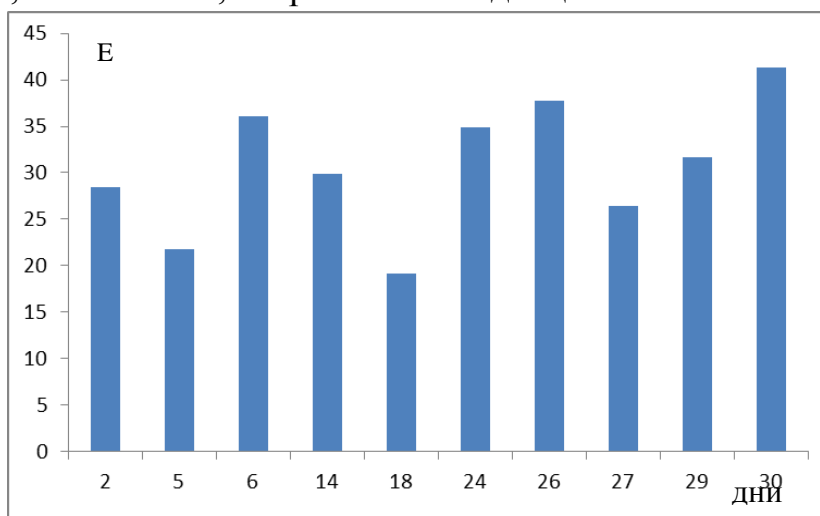


Рис. 2. Распределение рассчитанных значений испарения (мм) в пункте Шамкир за март месяц 2010 г.

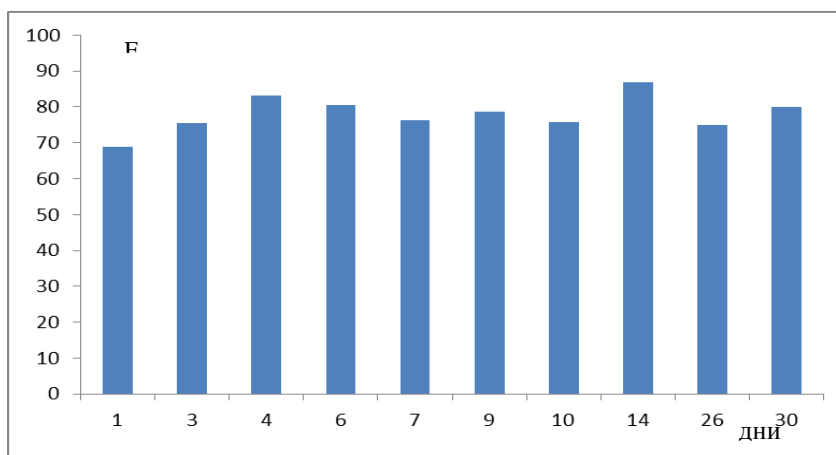


Рис. 3. Распределение рассчитанных значений испарения (мм) в пункте Шамкир за июнь месяц 2010 г.

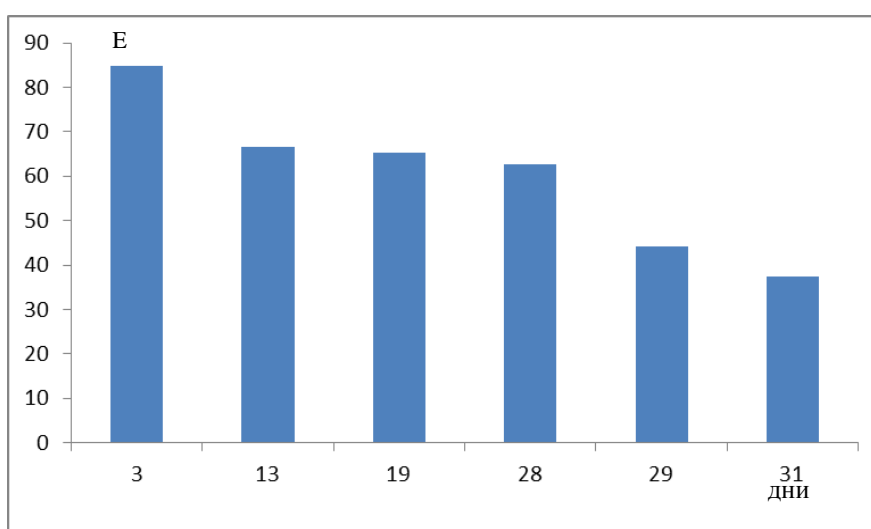


Рис. 4. Распределение рассчитанных значений испарения (мм) в пункте Шамкир за сентябрь месяц 2010 г.

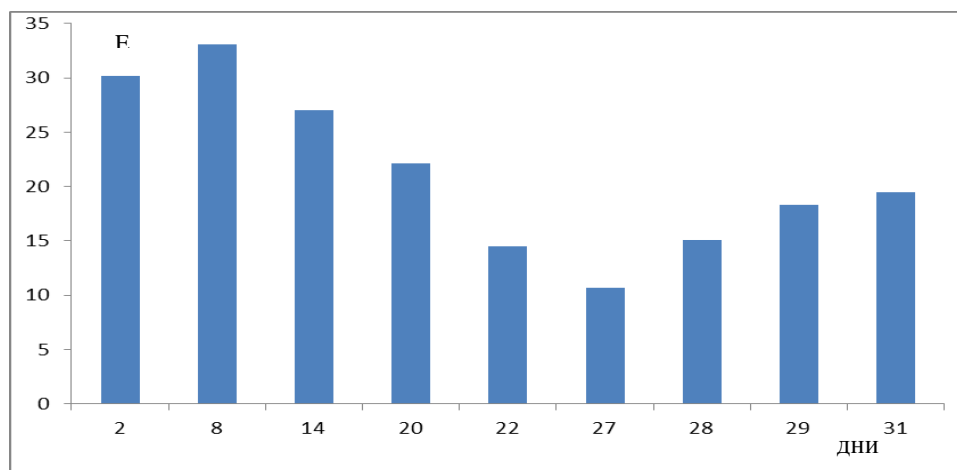


Рис. 5. Распределение рассчитанных значений испарения(мм) в пункте Шамкир за декабрь месяц 2010 г.

Оценки как испарения со свободных поверхностей воды и с почвы, так и суммарного испарения с неоднородных поверхностей, имеют большое значение для гидрологического моделирования, а также для гидрометеорологических и сельскохозяйственных исследований, например, при проектировании и эксплуатации водохранилищ, ирригационных и дренажных систем.

### Литература

1. Шихлинский Э.М. Тепловой баланс Азербайджана 1978, 92 с.
2. Братсерт У.Х. Испарение в атмосфере. Л., Гидрометеиздат, 1985, 350 с.
3. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л., Гидрометеиздат, 1956. 255 с.
4. Зубенек Л.И. Испарение на континентах. Л., Гидрометеиздат, 1976. 263 с.
5. Климат Азербайджана. Под ред. А.А. Мадатзаде и Э.М. Шихлинского. Баку. Изд-во АН АзССР, 1968. 344 с.
6. Stephens J. C., Stewart E. H. (1963). A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration. General Assembly of Berkeley, Int. Assoc. Hydrology, Publ. N 62, p. 123-133.

### Summary

Mamedov A., Hasanova N., Akhmedova V. **Calculation of Evaporation Using the Heat Balance Equation.**

*The article analyzes the methods of studying evaporation. As is known, errors in the measurement of evaporation raise the question of its theoretical calculation. For this, one of the known calculation methods is used – the heat balance equation, and to further simplify the solution of this problem, indefinite indices are used, taking into account the influence of wind and humidity. The mathematical expression proposed by Jensen and Hayes for California, with the calculated new coefficients, is applied for Shamkir station. Calculations are made for different seasons on selected characteristic days. When determining the coefficients, the value of the correlation coefficient between the rows is equal to  $r = 0.86$ .*

**Keywords:** possible evaporation, evaporation, indices, correlation, radiation, coefficient.