

УДК 556.5

Канд. техн. наук

П.Ж. Кожаметов<sup>1</sup>Г.Е. Монкаева<sup>1</sup>**ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ  
ФАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГГИ-3000  
(НА ПРИМЕРЕ ИЛЕ-БАЛКАШСКОГО БАССЕЙНА)**

**Ключевые слова:** испарение, оценка количества испарения, метод множественной регрессии, распределение годового количества испарения, зависимость испарения от высоты местности

*В статье проведена оценка количества испарения с водной поверхности в Или-Балкашском бассейне на основе фактических данных измерений за испарением на метеостанциях за период 1980...1995 гг. В связи с наличием пропусков в наблюдениях, применены различные методы восстановления данных. Для построения карты пространственного распределения годового испарения получена зависимость испарения от высоты местности в горных районах.*

Испарение это процесс фазового перехода вещества из жидкого состояния в газообразное. Процесс испарения в природе зависит от многих факторов, главнейшими из которых являются увлажненность подстилающей поверхности и метеорологические условия над нею. К метеорологическим условиям могут быть отнесены: интенсивность солнечной радиации, температура воздуха, влажность воздуха и скорость ветра. Последняя определяет собой интенсивность турбулентного перемешивания. Влажность воздуха при заданной увлажненности и температуре подстилающей поверхности определяет величину вертикального градиента влажности. Эти факторы непосредственно влияют на интенсивность испарения, которое пропорционально их величине. Зависимость испарения от солнечной радиации более сложная. Солнечные лучи, нагревающие поверхность, оказывают влияние на вертикальный градиент температуры воздуха, который в свою очередь воздействует на интенсивность турбулентного перемешивания и тем самым на испарение. Градиенты температуры и влажности воздуха в атмосфере, обуславливающие испарение, могут быть непосредственно измерены инструментально [3].

---

<sup>1</sup> Казгидромет, г. Алматы, Казахстан

Оценка испарения необходима для определения водного баланса, какого либо водного объекта или территориального бассейна. Оценка испарения с водной поверхности может быть произведена с использованием целого ряда методов. Значительное количество методов объясняется тем, что сложный механизм взаимодействия между водной поверхностью и прилегающей к ней воздушной массы еще полностью не раскрыты [3].

Основной способ определения испарения, это инструментальный, т.е. проведение измерений с помощью определенных гидрологических приборов и определения испарения при помощи различных эмпирических формул. Более точным из разработанных методов считается инструментальный (прямой) метод, т.е. метод непосредственного измерения слоя испарившейся воды с помощью водных испарителей. А с помощью эмпирических методов оценивается суммарное испарение без подразделения его на испарение с почвы, транспирацию (испарение растениями) и испарение влаги, задержанной стеблями и листьями при выпадении осадков [3].

Для изучения различных факторов, оказывающих влияние на испарение с водной поверхности, организована сеть водноиспарительных станций, сравнительно равномерно распределенная по территории Казахстана. Испарение в Казахстане в основном определяются на станциях Казгидромета с помощью оборудования ГГИ-3000 с испарительной площадью 3000 см<sup>2</sup> и высотой 60 см. Как известно стандартное наблюдение на водноиспарительных площадках 3 и 2 типа и плавучих испарительных установках производится 4 раза в сутки, через равные промежутки времени 0, 6, 12, 18 час согласно СГВ. Измеряется температура поверхности слоя воды, скорость ветра над площадкой (на высоте 2 м), а также атмосферные осадки. Наблюдения производятся только в теплое время года (в периоды с устойчивой положительной температуры воздуха), т.е. начало периода наблюдений определяется весенней датой полного схода снежного покрова на территории испарительной площадки и окончание сезона наблюдений определяется осенней датой установления ледяного покрова в испарителе [6]. Оценка среднего многолетнего количества испарения была выполнена за период с 1980 по 1995 гг.

Как известно, в 90-е годы прошлого века, из-за финансовых трудностей, Казгидромет был вынужден сократить свои наблюдательные пункты. Кроме того из плана наблюдений на многих станциях были исключены наблюдения за испарением с водной поверхности с помощью ГГИ-3000. Так, например, если в Иле-Балкашском бассейне в 80-е годы

наблюдение за испарением с водной поверхности производилось на 13 метеостанциях (М), то к концу прошлого века их количество резко сократилось и в настоящее время наблюдение за испарением производится лишь на 3-х станциях. Естественно, такое количество не позволяет оценить пространственное распределение испарения с водной поверхности, тем более в условиях неоднородности рельефа, каковым является Иле-Балкашский бассейн.

Учитывая важность фактических данных для гидрологической оценки территории и для расчета водного баланса, авторами предпринята попытка оценить пространственное распределение испарения с водной поверхности на примере Иле-Балкашского бассейна за период (1980...1995 гг.), когда число наблюдательных пунктов было максимальным (табл. 1).

Таблица 1

Список станций, привлеченных для оценки испарения в Иле-Балкашском бассейне

Метеорологическая станция	Высота над уровнем моря, м
Капшагай	496
Алматы	847
Есик	1098
озеро Улкен Алматы	2516
Шелек	606
Мынжылкы	3017
Карашоқы	492
Жаркент	643
Айдарлы	498
Уштобе	421
Сарканд	764
Балкаш	350
Чиганак	349

Однако, несмотря на относительно удовлетворительное количество наблюдательных пунктов в Иле-Балкашском бассейне, оценка пространственного распределения годового испарения была сопряжена с некоторыми трудностями, а именно:

1. На всех 13 станциях наблюдения производились лишь в теплое полугодие, в основном с апреля по октябрь.
2. Все станции (за исключением М Чиганак) имели пропуски в наблюдениях в разные годы и месяцы.

В связи с этим возникла необходимость восстановления пропусков в месяцы с отсутствующими данными. Прежде, чем восстанавливать данные был проведен критический анализ фактических измерений. Сомнительные данные были забракованы.

**Восстановление отсутствующих данных теплого периода.** Рассматриваемые метеорологические станции расположены на разных высотах, следовательно при восстановлении фактических данных необходимо учитывать рельеф местности.

При восстановлении данных (за период с апреля по октябрь) для различных территорий применялись разные методы. Для равнинной и предгорной территории применялось уравнение множественной регрессии и уравнение Н.Н. Иванова [2], а для горной местности – эмпирическая формула Литовченко-Мазур [5, 7].

**Формула Н.Н. Иванова** [2] определяет испаряемость по данным среднемесячной температуры и относительной влажности воздуха:

$$E = 0,0018(T + 25)^2 \cdot (100 - r), \quad (1)$$

где  $T$  – средняя месячная температура воздуха, °С;  $r$  – относительная влажность воздуха, %. Уравнение Иванова в исследованиях А.Р. Константинова [3] и К.И. Харченко [1] использованы для расчета испарения в степных районах и ими получены удовлетворительные результаты. Однако, в нашем случае, разница фактических данных от расчетной величины примененного уравнения Иванова на многих равнинных метеостанциях показал высокие отклонения, от 11 до 52 %, кроме М Семиярка, тогда как погрешности уравнения регрессии на многих станциях не превышали 11...16 %.

**Метод восстановления по уравнениям множественной регрессии.** Для оценки множественной регрессии использовались данные только тех станций, где длина ряда наблюдений составляла около 30 лет, поэтому уравнения множественной регрессии применялись не для всех метеостанций, а только для семи. Это следующие метеостанции: Сарканд, Уштобе, Балкаш, Айдарлы, Капшагай, Карашоки и Шелек.

На основе корреляционного анализа были выбраны наиболее коррелируемые параметры – температура и относительная влажность воздуха. С помощью этих параметров были получены уравнения множественной регрессии и восстановлены значения испарения с водной поверхности.

В табл. 2, 3, 4 в качестве примера приведены результаты регрессионного анализа для М Уштобе, характеризующие регрессионную статистику, результаты дисперсионного анализа и другие коэффициенты.

Таблица 2

Регрессионная статистика данных для М Уштобе

Множественный R	0,85
R-квадрат	0,72
Стандартная ошибка	20,65
Количество наблюдений	181

Таблица 3

Дисперсионный анализ данных для М Уштобе

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2	193819,7	96909,8	227,3	0,0
Остаток	178	75891,2	426,4		
Итого	180	269710,9			

Таблица 4

Оценка уравнения регрессии для М Уштобе

	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Y-пересечение	186,61	18,10	10,31	0,00	150,90	222,32
Температура	3,44	0,35	9,95	0,00	2,76	4,12
Влажность	-2,32	0,27	-8,62	0,00	-2,85	-1,79

Значение множественного коэффициента детерминации R-квадрат говорит о том, какая доля общей вариации резульативного признака (испарения) объясняется вариацией факторных признаков. Рассчитанный уровень значимости (Значимость F) менее 0,05 подтверждает значимость R-квадрат. Стандартные ошибки коэффициентов регрессии должны быть меньше значений самих коэффициентов, а также P-значение для этих коэффициентов меньше заданного уровня значимости (например, 0,05).

Ряды наблюдений за испарением на М Чиганак, М Есик и М Алматы были короткими (менее 10 лет), восстанавливались при помощи формулы Н.Н. Иванова [2]. Однако данная формула неприменима для горных районов, поэтому для восстановления пропусков наблюдений на М Мынжылкы (3017 м над уровнем моря) и Улкен Алматы (2516 м над уровнем моря) была использована формула Литовченко-Мазур [5, 7]:

$$E_{0,мес} = \frac{a \cdot 1,07^t}{0,001 \cdot P}, \quad (2)$$

где  $a$  – параметр, зависящий от экспозиции склона (была принята средняя величина  $a = 39,2$ );  $t$  – средняя месячная температура воздуха, °С;  $P$  – атмосферное давление, мб.

В табл. 5 представлены средние погрешности методов восстановления фактических данных испарения с водной поверхности. Имея фактические ряды наблюдений, но в то же время подразумевая, что фактических рядов наблюдений нет, восстановили ряды наблюдений. Далее сравнив фактические и восстановленные данные, выявили отклонения за каждый год, а затем рассчитали среднее отклонение за период с 1980 по 1995 годы.

Таблица 5

Средние погрешности фактических данных количества испарения с водной поверхности за теплый период, %

Станция	Высота, м абс	Погрешность		
		формула Иванова	уравнение регрессии	формула Литовченко-Мазур
Балкаш	350	24	10	-
Уштобе	421	33	12	-
Карашоки	492	17	11	-
Капшагай	496	20	10	-
Айдарлы	498	17	15	-
Шелек	606	15	14	-
Жаркент	643	11	11	-
Сарканд	764	33	16	-
Алматы	847	52	период наблюдений 10 лет	-
Есик	1098	14	15	-
оз. Улкен Алматы	2516	-	нет корреляции	23
Мынжылкы	3017	-	нет корреляции	14

*Примечание:* для М Чиганак данные не требовали восстановления, так как были полные фактические ряды наблюдения.

**Восстановление отсутствующих данных холодного периода.**

Как было сказано выше на метеостанциях Казахстана наблюдения за испарением в холодный период года не производятся. Поэтому для определения ежемесячных значений испарения за холодное время года (ноябрь – март) использовался эмпирический метод. Восстановление значений испарения за холодный период (с отрицательными средними многолетними месячными температурами воздуха) со всех типов подстилающей поверхности выполнено по формуле П.П. Кузьмина [4]:

$$E_a = 0,34 \cdot n \cdot d, \quad (3)$$

где  $E_a$  – количество испарения за месяц, мм;  $n$  – число дней в месяце;  $d$  – средние суточные значения дефицита влажности воздуха для конкретного месяца, мб.

Проверить погрешности восстановления количества испарения при помощи формулы П.П. Кузьмина в холодный период невозможно в связи с отсутствием фактических данных измерений. Но, необходимо отметить, что значения количества испарения в холодный период года незначительные, не более 10 % от годовой суммы.

Результаты расчета среднего многолетнего количества испарения с учетом восстановленных значений за период 1980...1995 гг. представлены в табл. 6.

Таблица 6

Среднее многолетнее годовое количество испарения с водной поверхности, мм

Метеорологическая станция	Высота, м	Испарение
Капшагай	496	1119
Алматы	847	1113
Есик	1098	1246
оз. Улкен Алматы	2516	608
Шелек	606	1412
Мынжылкы	3017	530
Карашоки	492	1518
Жаркент	643	1395
Айдарлы	498	1471
Уштобе	421	967
Сарканд	764	942
Балкаш	350	1559
Чиганак	349	1543

Таким образом, для восстановления количества испарения с водной поверхности можно применить различные эмпирические формулы как для теплого, так и для холодного периода и конечно же у каждого метода есть погрешности. Но в условиях эмпирического восстановления для теплого периода наиболее близким к фактическими значениям является метод множественной регрессии с двумя параметрам. Для холодного периода – метод Кузьмина П.П.

Получив средние годовые значения испарения была выполнена оценка пространственного распределения испарения в Иле-Балкашском бассейне. Известно, что Ил-Балкашский бассейн характеризуется большой

неоднородностью – от равнинных пустынь до высокогорий. Поэтому оценка пространственного распределения невозможно без учета рельефа и особенно высоты местности.

Для горных районов нами установлена высотная зависимость среднегодового количества испарения от высоты местности над уровнем моря (рис. 1).

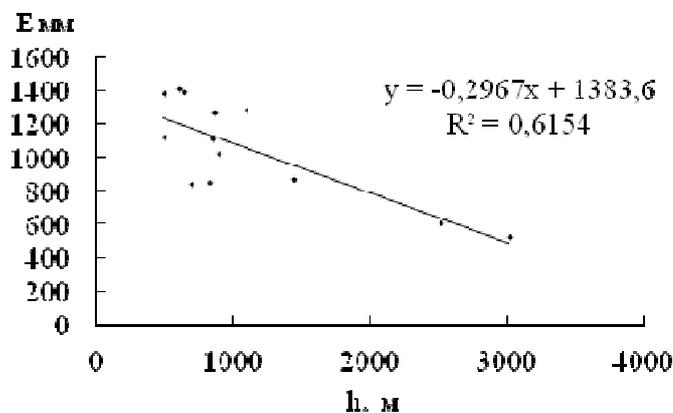


Рис. 1. Зависимость среднегодового испарения с водной поверхности от высоты местности над у.м., бассейн р. Иле – оз. Балкаш (Иле Алатау и Жетысу Алатау).

В Или-Балкашском бассейне высотная зависимость хорошо прослеживается, начиная с высоты 1000 м абс. Для построения карты, значения среднемноголетнего годового количества испарения по каждой станции в Или-Балкашском бассейне наносились на карту и по ним проведены изогиеты, с учетом орографических особенностей региона (рис. 2) [8]. Изолинии на картах средних многолетних годовых значений испарения с водной поверхности нанесены через 100 мм [9].

Территориальное распределение среднего многолетнего количества испарения с водной поверхности в Или-Балкашском бассейне неравномерное. В межгорной Илейской впадине с абсолютными высотами до 800 м абс, годовое испарение составляет 1200...1400 мм. Максимальное значение испарения в районе Капшагайского водохранилища достигает 1518 мм за год (М Карашоки). Хребты, расположенные с левого и с правого берега р. Иле (Илейский Алатау, Жетысуский Алатау, хребет Кетмень), оказывают существенное влияние на распределение испарения. Чем выше высота местности, тем меньше величина испарения. В равнинной части бассейна р. Иле существенное влияние оказывает оз. Балхаш. В Прибалхашье значения годового испарения превышают 1200 мм. Максимальное значение

испарения (1500...1560 мм) характерно для западной части оз. Балхаш и прилегающей к этой части территории.



Рис. 2. Распределение среднего многолетнего годового количества испарения с водной поверхности на территории Или-Балкашского бассейна.

Данное исследование не дает исчерпывающего ответа о распределении годового испарения с водной поверхности в Иле-Балкашском бассейне. Причиной является недостаточность наблюдательных пунктов (особенно в высокогорных районах), наличие пропусков в наблюдениях, отсутствие наблюдений в холодное время года и т.д. В дальнейшем необходимо продолжить данное исследование, результаты которого будут полезны при водно-балансовых расчетах.



*әртүрлі методтар арқылы қалпына келтірілді. Жылдық буланудың кеңістік таралуының картасын сызу үшін таулы аймақтардың биіктікпен байланысы табылған.*

Kozhakhmetov P.ZH., Monkayeva G.E.

**EVALUATION OF EVAPORATION FROM THE WATER SURFACE  
ON THE BASIS OF ACTUAL MEASUREMENT DATA WITH THE  
HELP OF GGI-3000 (ON THE EXAMPLE OF THE ILE-  
BALKHASH BASIN)**

**Key words:** evaporation, estimate of the amount of evaporation, method of multiple regression, distribution of the annual amount of evaporation, the dependence of evaporation on the altitude

*The article estimates the amount of evaporation from the water surface in the Ili-Balkash basin on the basis of the actual measurement data for evaporation at weather stations for the period 1980-1995. Due to the presence of many gaps in the observations, various methods of data recovery have been applied. To construct a map of the spatial distribution of annual evaporation, the dependence of evaporation on the altitude of the terrain in mountain regions was obtained.*