

А.Н. Постников

МЕТОД РАСЧЕТА ИСПАРЕНИЯ С ПОЧВЫ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ ЗОНАХ

A.N. Postnikov

EVAPORATION COMPUTING METHOD FROM GROUND IN DIFFERENT NATURAL ZONES

Интенсивность испарения с поверхности почвы в теплый период года после обильного увлажнения и последующем отсутствии атмосферных осадков непрерывно убывает с течением времени, но выпадающие затем осадки вновь увеличивают эту интенсивность. В работе предлагается метод расчета испарения, основанный на зависимости испарения от дефицита влажности воздуха и учете распределения осадков внутри расчетного периода, изменяющих интенсивность испарения. Расчеты проводятся на компьютере по прилагаемой программе на языке Turbo Паскаль 7.0.

Ключевые слова: метод расчета испарения, учет распределения осадков, расчет на компьютере.

Evaporation rate from surface ground in a warm season after abundant moistening and follow-up absence of atmospheric precipitation decreases continuously in course of time, but precipitation after that increases this rate. Evaporation computing method based on evaporation dependence on air humidity deficit and accounting of rainfall distribution within estimated period changing evaporation rate is offered in the work. Calculation is made by computer with attached program using Turbo PASCAL 7.0.

Key words: Evaporation computing method, accounting of rainfall distribution, calculation by computer.

Испарение с поверхности суши является одной из важнейших составляющих водного баланса речных бассейнов и отдельных участков земной поверхности. Поэтому желательно иметь методы расчета испарения, достаточно надежные и вместе с тем легко доступные для использования, базирующиеся на данных наблюдений гидрометеорологической сети и не требующих проведения регулярных, сложных, трудоемких, а порой и технически неосуществимых измерений для получения информации, необходимой для расчета испарения по тому или иному методу.

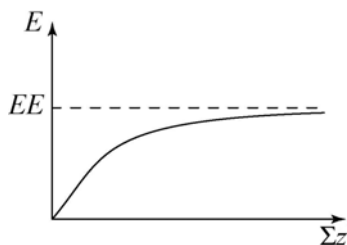
В настоящей работе предлагается эмпирический метод расчета испарения с почвы в теплую часть года, основанный на связи испарения с дефицитом влажности воздуха и учете количества и распределения осадков за расчетный период.

Обоснование метода

В природных зонах, где за зимний период на рассматриваемой территории к концу зимы накапливается достаточно большие запасы снега и после окончания снеготаяния первый метровой от поверхности слой почво-грунтов оказыва-

ется ежегодно увлажненным примерно до уровня наименьшей влагоемкости (НВ), т.е. до максимально возможного для данного вида почвы запаса негравитационной, нестоковой воды. К таким природным зонам можно отнести лесную, лесостепную и, с осторожностью, степную [Константинов, 1971; Леонова, 1974].

При начальных значениях влагозапасов в почве, равных НВ, величины испарения за любой по продолжительности период времени после схода снега при отсутствии осадков будет обуславливаться ежегодно только метеорологическими элементами. В таком случае, начиная с момента схода снега, можно было бы за любой период времени найти зависимость $E = f(\Sigma Z)$, где E – испарение, ΣZ – некоторая суммарная совокупность метеозлементов, имеющая связь с испарением. Так как влагозапасы почвенного слоя не пополняются, а только непрерывно расходуются на испарение, то на единицу переменной ΣZ с течением времени будет приходиться все меньшее испарение, т.е. суммарное испарение с ростом ΣZ будет расти все медленнее и медленнее и будет стремиться к некоторому пределу (EE). Величина этого предела будет определяться видом почвы и ее водно-физическими константами. Схема изложенного представлена на рисунке. В таком случае (при отсутствии осадков), имея кривую, изображенную на рисунке, суммарное испарение за расчетный период можно было бы определять по величине ΣZ за этот период. Предположим, что наша кривая, которую уместно назвать «кривой иссушения», построена на самом деле. Теперь будем рассматривать реальную ситуацию, т.е. с выпадением осадков. Выпавшие осадки «будем испарять» по той же кривой, каждый раз смещаясь в начало координат. Такова схема метода в самых общих чертах. Наполним ее теперь более конкретным содержанием.



В работе автора [Постников, 1974] было показано, что в течение некоторого интервала времени после схода снега весной расчет испарения с почвы можно производить по формуле

$$E = 0,44\Sigma d, \quad (1)$$

где E – испарение за расчетный период, мм; Σd – сумма среднесуточных значений дефицита влажности воздуха (гПа) за тот же период.

А.М. Алпатьевым было установлено, что в условиях оптимального увлажнения почвы в период активной вегетации растений имеет место зависимость [Алпатьев, 1954]

$$E = 0,65\Sigma d. \quad (2)$$

Объединяя результаты этих работ, можно сказать, что испарение с обильно увлажненной почвы как в ранний весенний период, когда испарение за счет транспирации пренебрежимо мало, так и позже в условиях развитой транспирации довольно тесно связано с дефицитом влажности воздуха. Поэтому в качестве упомянутой выше переменной ΣZ была принята сумма дефицита влажности воздуха Σd , которая для сокращения записи, обозначена далее как t .

Обратимся опять к рисунку, учитывая, что теперь ΣZ нужно воспринимать как t . Мы видим, что темп роста E с ростом t непрерывно уменьшается и в пределе стремится к нулю. Это дает право предположить, что производная от E по t может быть представлена в виде

$$\frac{dE}{dt} = a(E - E). \quad (3)$$

После несложных операций интегрирования и выбора постоянной интегрирования получим

$$E = EE(1 - e^{-at}). \quad (4)$$

Полученное выражение аппроксимирует «кривую иссушения» и является расчетной формулой в предлагаемом методе. При известных значениях EE и a примерная схема расчета выглядит следующим образом.

Исходные данные: ежедневные значения осадков и дефицита влажности воздуха. Начало расчета испарения – через некоторый промежуток времени Δt после весеннего схода снежного покрова. Величина Δt будет названа позже. Если в течение нескольких дней не было осадков, то за эти дни суммируются значения дефицита влажности воздуха и подставляются в формулу (4) и получается значение испарения. Если далее начинают выпадать осадки, то интенсивность испарения резко возрастает и на расчетной кривой мы должны каждый раз переходить в начало координат ($t = 0$). При этом величины осадков и характер их выпадения могут быть разными: они могут испариться полностью в течение i -го дня, а могут и не испариться; они могут выпадать в последующий день (дни), а могут и не выпадать. Алгоритмы учета осадков в перечисленных случаях должны быть разными. Переходя каждый раз в начало координат, необходимо вести учет остатков осадков с тем, чтобы правильно определять значение t за каждые сутки. Некоторое представление о сложности учета осадков и определения значения t дает следующий пример. Пусть в течение многих дней не было осадков и значение t за этот период составило $t = t_1 = 120$ гПа. Затем выпали большие осадки. На кривой мы вернулись в начало координат и считали, что в последующие дни испарение происходило только за счет этих осадков. Через несколько дней выпали небольшие осадки. Пусть перед их выпадением мы имели $t = t_2 = 50$ гПа и остаток больших осадков 5 мм. Снова произошел возврат в начало координат. Началось испарение малых осадков. Пусть после их

испарения t приняло значение $t = t_3 = 15$ гПа и далее некоторое время осадки не выпадали. Теперь из точки t_3 надо вернуться в точку t_2 и считать, что испарение идет за счет остатка больших осадков. Затем после испарения остатка больших осадков надо вернуться в точку t_1 .

Изложенное уже указывает на сложность алгоритма расчета испарения, однако, в действительности имеют место более сложные ситуации, встречающиеся в большом количестве в течение теплого периода года. Поэтому расчет испарения по предлагаемому методу «вручную» с использованием только калькулятора является сложной, трудоемкой задачей и для успешного ее решения требуется применение компьютера. В приложении 1 помещена программа для расчета испарения, составленная автором на языке Турбо Паскаль 7.0, в которой реализован один из возможных вариантов учета осадков.

Нужно отметить, что предлагаемый в данной работе метод расчета испарения является усовершенствованной, более формализованной модификацией метода, опубликованного автором более тридцати лет назад [Постников, 1977], где все расчеты проводились «вручную», что сильно затрудняло и фактически делало невозможным его применение на практике.

Оценка результатов расчета по предлагаемому методу

Определение значений параметров в уравнении (4) и проверка метода проводились по материалам наблюдений на почвенно-испарительных площадках воднобалансовых станций, указанных в табл. 1. В работе использованы материалы наблюдений только с поверхности, занятой травянистой растительностью (луг, залежь, целина, многолетние травы), которая многими исследователями [Константинов 1968, 1971] считается эталонной в том смысле, что величины испарения с этой поверхности дают представление об испарении с различных сельхозугодий.

Таблица 1

**Состав водно-балансовых станций и периодов,
по которым проводились расчеты в данной работе**

Станция, ее местоположение	Количество	
	месяцев	теплых периодов
Л е с н а я з о н а		
Валдайская, Новгородская обл.	96	17
Подмосковная, Московская обл.	72	12
Прибалтийская, Латвия	53	10
Л е с о с т е п н а я з о н а		
Нижнедевицкая, Курская обл.	55	8
Каменная Степь, Тамбовская обл.	54	8
Придеснянская, Белоруссия	35	6
С т е п н а я з о н а		
Дубовская, Ростовская обл.	61	5
Велико-Анадольская, Украина	42	6
В с е г о	468	76

Для использования на практике уравнения (4) необходимо знать значения параметров a и EE . Для определения величины EE – предельно возможного испарения за теплый период при отсутствии осадков, были использованы материалы наблюдений по почвенным испарителям на Валдайской и Нижнедевицкой водно-балансовых станциях за засушливые теплые периоды 1972 и 1975 гг. Как известно, наблюдения на почвенно-испарительных площадках производятся один раз в пять дней. При построении «кривых иссушения» нарастающие по пентадам суммы измеренного испарения сопоставлялись с нарастающими суммами дефицита влажности воздуха. В случае выпадения осадков, как правило малых, испарение за такие пентады уменьшалось на величину этих осадков, а величины Σd , необходимые для их испарения, исключались из общей суммы дефицита с помощью формулы (1), в которой испарение приравнивалось осадкам.

Выяснилось, что построенные таким образом «кривые иссушения» по материалам наблюдений на двух, названных выше станциях, очень мало отличаются одна от другой и испарение за продолжительные периоды при отсутствии осадков стремиться к величине в 140 мм, на основании чего далее считалось, что $EE = 140$ мм.

При выборе значений a автор руководствовался следующими представлениями об эволюции процесса испарения в течение теплого периода. Некоторое время после схода снежного покрова в весеннее время испарение происходит почти исключительно с переувлажненной поверхности почвы, а транспирация луговых растений пренебрежимо мала. Назовем это время первой фазой испарения. Далее начинается подсыхание верхнего слоя почвы, физическое испарение по-прежнему преобладает над транспирацией (вторая фаза). Затем начинается активная вегетация растений и транспирация начинает преобладать над испарением непосредственно с поверхности почвы (третья фаза). В четвертой, последней, последней фазе развитие растений закончено, транспирация заметно снижается, возрастает роль физического испарения непосредственно с поверхности почвы и задержанной дождевой воды с поверхности растений. На основании изложенного и обработки обширного объема данных по испарению были установлены следующие правила расчета испарения.

В первой фазе, продолжительность которой составляет две недели, расчет испарения проводится по формуле (1). Вторая фаза продолжается 15 дней и с начала ее начинает применяться предлагаемый метод. Согласно уравнению (1) при испарении с увлажненной поверхности в это время года на единицу дефицита влажности воздуха в среднем приходится 0,44 мм/гПа. Отсюда получаем значение a для второй фазы $a = 0,44/EE = 0,0031$ 1/гПа.

Для определения значения a в третьей фазе учитывалось уравнение (2), согласно которому должно быть $\frac{dE}{dt} = 0,65$ мм/гПа. Однако это средняя величина

нами эта величина была принята несколько большей и равной 0,70 мм/гПа, так как здесь счет испарения идет за суточные интервалы времени и вполне воз-

можно считать, что в первые сутки после выпадения осадков на единицу дефицита будет приходиться большее испарение, чем за весь период испарения данных осадков. Поэтому в третьей фазе $a = 0,70/140 = 0,005$ л/гПа. Третья фаза заканчивается через 150 дней (5 месяцев) после от начала второй фазы, т.е. начала расчета по данному методу.

При выборе значения a для четвертой фазы мы, с одной стороны, учитывали уравнение (1), но, с другой стороны, считали, что в осенние месяцы транспирация растений заметно больше, чем в условиях ранней весны. Поэтому для этой фазы значение $\frac{dE}{dt}$ было принято равным 0,5 мм/гПа и, соответственно, $a = 0,5/140 = 0,0036$ л/мм.

Расчеты проводились на компьютере по программе, написанной на языке Турбо Паскаль 7.0, текст которой с необходимыми пояснениями приведен в приложении 1. По программе рассчитываются суточные значения испарения, которые затем суммируются за нужные интервалы времени. В общей сложности расчеты были проведены за 76 теплых периодов. Под последними понимались промежутки времени, за которые проводились наблюдения за испарением на данной станции в данном году. Сравнение рассчитанных и наблюдаемых значений испарения проводилось за месячные интервалы времени (463 случая) и за весь теплый период в целом (табл. 2).

Таблица 2

Статистические оценки расчета испарения по данному методу

Расчетный период	E_n , мм	E_p , мм	δ , мм	δ/E_n , %	R
Дефицит ежедневный					
Месяц	59	61	13	21	0,90
Теплый период	368	373	32	9	0,86
Дефицит среднедекадный					
Месяц	60	61	12	20	0,90
Теплый период	374	373	36	10	0,82

Примечания: E_p и E_n – соответственно средние значения испарения рассчитанного и наблюдаемого; δ – среднеквадратическая погрешность расчета; R – коэффициент корреляции между рассчитанными и наблюдаемыми значениями испарения.

Расчет испарения проводился по двум вариантам. В первом из них использовались значения ежедневного среднесуточного дефицита влажности воздуха, во втором – среднедекадного дефицита, при этом считалось, что в каждый день какой-либо декады дефицит равен его среднедекадному значению. Второй вариант расчета был осуществлен потому, что хотелось сократить объем исходной информации и выяснить, как скажется это сокращение на точности расчета. Данные табл. 2 показывают, что оба варианта дают мало различающиеся результаты при оценках испарения как за месячные интервалы времени, так и за теплый период в целом. Средние значения измеренного и рассчитанного испа-

рения очень близки друг другу как в первом, так и во втором вариантах. Среднеквадратические погрешности расчета по первому и второму вариантам равны соответственно за месяц 13 и 12 мм, а за теплый период 32 и 36 мм, что составляет по отношению к средним значениям за месяц соответственно 21 и 20 %, а за теплый период 9 и 10 %. Данные табл. 2 показывают также, что коэффициенты корреляции между измеренными и рассчитанными значениями испарения достаточно высокие.

С целью сравнения были проведены расчеты испарения по тем же пунктам и в том же объеме по широко известному и часто используемому методу А.Р. Константинова [Константинов, 1968, 1971]. Оценки результатов расчета приведены в табл. 3, в которой обозначения те же, что и в табл. 2.

Таблица 3

Статистические оценки расчета испарения по методу А.Р. Константинова

Расчетный период	E_p , мм	E_n , мм	δ , мм	δ/E_n , %	R
Месяц	60	61	21	34	0,71
Теплый период	380	373	68	18	0,60

Примечание. Расчетные средние значения испарения за теплый период были получены путем суммирования месячных величин.

Данные табл. 3 говорят о том, что осредненные по большому количеству случаев измеренные и рассчитанные значения испарения как за месяц, так и за теплый период очень близки друг к другу. Вместе с тем относительные погрешности достаточно велики: 35 % для месячного интервала и 18 % для теплого периода, что заметно превышает аналогичные оценки погрешностей, приведенные в табл. 2.

Таким образом, можно сказать, что предлагаемый метод способен успешно конкурировать, по крайней мере, с некоторыми широко известными методами расчета и, поэтому может быть пригоден для расчета испарения с поверхности суши в теплый период года.

К недостаткам метода, по-видимому, надо отнести то обстоятельство, что за какой бы интервал времени внутри конкретного теплого периода ни требовалось рассчитать испарение, этот расчет необходимо начинать с раннего весеннего времени – с начала второй фазы испарения, для чего в компьютер должны быть введены ежедневные значения дефицита влажности воздуха и осадков, начиная с этого момента времени и до конца расчетного периода. На первый взгляд может показаться, что это связано с большими затратами времени. Однако, из опыта автора было установлено следующее: расход времени на выкопировку названных данных из соответствующих кадастровых источников за шести-семимесячный теплый период составляет 20–25 минут и еще столько же требуется времени на занесение этих данных в компьютер. Таким образом, общие затраты времени на расчет испарения внутри одного теплого периода не превышают одного часа. По-видимому, такие затраты времени можно считать вполне допустимыми.

Заключение

Предлагаемый в данной работе метод расчета испарения основан на использовании связи испарения с дефицитом влажности воздуха и с учетом осадков и их распределения внутри расчетного периода. График связи испарения с дефицитом влажности воздуха представляет кривую, названную «кривой иссушения», и аппроксимируется уравнением, которое является расчетным в данной работе.

Выпадающие осадки изменяют координаты точки отсчета на этой кривой, т.е. изменяют испарение, приходящееся на единицу дефицита влажности воздуха. Корректный учет влияния осадков на процесс испарения весьма сложен. В работе реализован один из возможных вариантов учета.

Расчет испарения осуществляется на компьютере по программе, написанной на языке Турбо Паскаль 7.0. Текст программы, снабженный необходимыми комментариями, прилагается. Пользователь, обладающий базовыми познаниями в языке, при необходимости, может внести нужные изменения и дополнения.

Предлагаемый метод обладает достаточно низкой погрешностью и может быть рекомендован к использованию для расчета испарения с поверхности суши в теплый период года в тех природных зонах, где за зимний период накапливаются существенные запасы воды в снежном покрове и ежегодно обеспечивается увлажнение верхнего слоя почв-грунтов, примерно, до значений наименьшей полевой влагоемкости.

Приложение 1

```
Program Liski;
Uses Crt,dos;
Label 1,2,3;
Const m=31; n=2;k1=1;k2=31;EE=140;
Type
TT = array [1..m,1..n] of Real;AE= array[1..m] of Real;AR= text;
var
f:Ar; X:TT; E:AE; t,z,z1,z2,a,b,ad,bd,az,sim:Real;
i,j, k: Integer;
begin
clrscr;
b:=0.44; a:=b/EE;
  Begin
Assign (f,'e:\VALN.txt'); Reset(f);
  for i:=1 to m do
begin
  for j:=1 to n do Read (f,X[i,j]); end; Close (f);
for i:=1 to m do
begin
```



```

for j:=1 to n do
X[i,j]:=0.1*X[i,j]; end;
t:=0;z:=0;
for i:=1 to m do
begin
if( i>15) and( i<= 150) then begin b:=0.70; a:=b/EE;end;
if i>150 then begin b:=0.50;a:=b/EE;end;
if X[i,2]=0 then goto 1
else
if X[i,2]<>0 then goto 2;
1: begin
z1:=EE*(1-exp(-a*t));
t:=t+X[i,1];
z2:=EE*(1-exp(-a*t));
z:=z2;
E[I]:= z2-z1;
end;
goto 3;
2: begin
ad:=X[i,2]/b;
bd:=X[i,1] -ad;
if bd>0 then
begin
z1:= EE*(1-exp(-a*t));
t:=t+bd;
z2:= EE*(1-exp(-a*t));
z:=z2;
E[i]:=X[i,2]+z2-z1;
end
else
if bd<0 then
begin
E[i]:= EE*(1-exp(-a*X[i,1]));
az:=X[i,2]- E[i];
z:=z-az;
if z<0 then z:=0;
t:=(-ln(1-z/EE))/a;
end
else
if bd=0 then
begin
E[i]:=EE*(1-exp(-a*X[I,1]));

```

```

end;end;
3: end;end;
sim:=0;
for i:=k1 to m do
begin
sim:=sim+E[i];
end;Writeln('Испарение ');Write('E=',sim:5:1);Readln;end.

```

Пример расчета испарения

Нужно рассчитать испарение за две последние декады мая в N -м году по Валдайской водно-балансовой станции. Снег сошел 15 апреля.

Согласно изложенному в данной работе, расчет испарения за две первые недели после схода снега производится по формуле (1). Следовательно, расчет по предлагаемому методу должен начинаться с 1 мая. Поэтому необходимо собрать данные по дефициту влажности воздуха и осадкам с 1 по 31 мая. Ввод данных удобно осуществлять в программе *Excel*. Ежедневные данные по дефициту влажности воздуха вводятся в столбец A , а осадкам – в столбец B . Те и другие данные записываются без выделения дробной части, как целые числа. Например, 12.3 записывается как 123, а 0.5 записывается как 5. За дни, когда осадки отсутствуют, в столбец B вводятся их нулевые значения. Ввод названной исходной информации начинается с первого дня второй фазы испарения и заканчивается последним днем расчетного периода, нужного потребителю (табл. 1а).

Таблица 1а

Ежедневные значения дефицита влажности воздуха и осадков в мае N -го года

N п/п	A	B	N п/п	A	B	N п/п	A	B
1	7	0	11	62	11	21	35	9
2	39	0	12	18	19	22	42	0
3	43	0	13	12	137	23	42	0
4	52	0	14	32	0	24	42	125
5	43	0	15	48	184	25	55	70
6	51	31	16	38	0	26	65	0
7	12	16	17	17	112	27	62	90
8	28	0	18	12	43	28	57	0
9	90	0	19	27	47	29	85	0
10	129	0	20	16	45	30	83	0
						31	28	0

Затем данному файлу присваивается имя, например, $VALN$, указывается диск, на котором он будет храниться, например E , файл переводится в текстовый формат и заносится на диск. Для обращения к этому файлу в операторе $ASSIGN$ необходимо указать диск, имя файла и его формат : $e:\ VALN.txt$ (см.

программу). Затем в разделе констант надо задать значения m и kI , помня, что счет дней начинается с первого дня второй фазы испарения. Здесь m – число дней от первого дня второй фазы (в данном случае это 1 мая) до конца расчетного периода; kI – начало расчетного периода, нужного для потребителя, т.е. некоторый i -й день после первого дня второй фазы. В данном случае $m = 31$, $kI = 11$. После указания значений m и kI программа транслируется (клавиши $Alt+F9$) и запускается на счет (клавиши $Ctrl+F9$). В данном случае получим: $E = 75,8$ мм.

Литература

1. *Алпатьев А.М.* Влагооборот культурных растений. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 248 с.
2. *Константинов А.Р.* Испарение в природе. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 532 с.
3. *Константинов А.Р., Астахова Н.И., Левенко А.А.* – Гидрометеиздат, 1971. – 128 с.
4. *Леонова Н.Е.* Временная и пространственная изменчивость влагозапасов почвы в правобережной части Верхнего Дона // Труды ГГИ. – 1974. – Вып. 214.
5. *Постников А.Н.* К методике расчета испарения в период снеготаяния и половодья в Центрально-Черноземных областях ЕТС // Труды ГГИ. – 1974. – Вып. 214, с. 70–83.
6. *Постников А.Н.* Схема расчета испарения с поверхности почвы в лесостепной и степной зонах ЕТС // Труды ГГИ. – 1977. – Вып. 233, с. 87–96.