

УДК 556.131.1 «45»

*А.Н. Постников***ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ СВЯЗИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМ ГОДОВОГО ИСПАРЕНИЯ**Российский государственный гидрометеорологический университет,
kafedra_gh@rshu.ru*A.N. Postnikov***ABOUT USAGE OF DIFFERENT COUPLING EQUATIONS
FOR ESTIMATING ANNUAL EVAPORATION RATE**

В статье рассматриваются оценки средних многолетних значений испарения с поверхности суши для территорий России и отдельных сопредельных стран, рассчитанные по шести уравнениям, связывающим тепловой и водный балансы поверхности суши. Выполнен сравнительный анализ результатов расчета. Показано, что рассмотренные уравнения дают приблизительно одинаковую, вполне допустимую погрешность при расчетах испарения. Используются предложения автора для определения параметров этих уравнений, что имеет большое значение для предсказаний климатологов о грядущих изменениях климата.

Ключевые слова: испарение, уравнения связи, водный баланс, Россия.

Estimations of normal evaporation for the territory of Russia and some adjacent countries calculated by six equations connecting heat and water balances of land surface are considered in the article. Comparative analysis of the results is carried out. It is shown, that the considered equations give approximately identical quite admissible error when calculating evaporation. The author's offers on specification of parameters of the equations are given that may be used in water balance calculations.

Keywords: evaporation, coupling equations, water balance, Russia.

Введение

Уравнения, связывающие годовые нормы осадков (P) и суммарного испарения (E) посредством параметра (E_0), в гидрометеорологической литературе обычно называют уравнениями связи. При этом параметр (E_0) называется испаряемостью, т. е. максимально возможным испарением для данных климатических условий при предположении, что испаряющая поверхность имеет избыточное увлажнение. Уравнения связи привлекают к себе заслуженное внимание многих исследователей, поскольку отображают универсальный для всех природных зон характер связи между элементами водного баланса и позволяют исследовать его структуру [3]. Вследствие предсказаний климатологов о грядущих изменениях климата, включающих в себя изменение пространственных полей температуры приземных слоев воздуха и атмосферных осадков, перед гидрологами встает задача об оценке суммарного испарения и речного стока в новых климатических условиях. Для решения этой задачи могут быть использованы названные уравнения.

В настоящей работе предпринимается попытка сравнения результатов применения таких уравнений при определении годового среднего многолетнего испарения

с части территории бывшего Советского Союза с целью выявления наиболее подходящего уравнения для выполнения этой задачи.

Уравнения связи

Все известные уравнения связи обладают следующими одинаковыми свойствами: производная от испарения по осадкам (dE/dP) при P , стремящемся к нулю, стремится к единице, а при P , стремящемся к бесконечности, стремится к нулю. Ниже приводятся наиболее часто встречающиеся в отечественной гидрометеорологической литературе уравнения связи. Пронумеруем их по порядку следования: (1) – Ольдекопа [3], (2) – Шрейбера [3], (3) – М.И. Будыко [1,7, 8], (4) и (5) – Н.А. Багрова [3], (6) – В.Н. Малинина [2], (7) – Тюрка [3]:

$$E = E_0 \operatorname{th}(P/E_0); \tag{1}$$

$$E = P[1 - \exp(-E_0/P)]; \tag{2}$$

$$E = [P(1 - \exp(-E_0/P)) E_0 \operatorname{th}(P/E_0)]^{0,5}; \tag{3}$$

$$E = E_0[1 - \exp(-P/E_0)]; \tag{4}$$

$$E = P \operatorname{th}(E_0/P); \tag{5}$$

$$\begin{cases} E = 0,9E_0 \text{ при } \frac{E_0}{P} \leq 0,78, \\ E = 1,06P(P/E_0)^{0,6} \operatorname{th}(E_0/P) \text{ при } \frac{E_0}{P} \geq 0,78; \end{cases} \tag{6}$$

$$E = P/[0,9 + (P/E_0)^2]^{0,5}, \tag{7}$$

где P и E_0 – соответственно, нормы годовых осадков и испаряемости; th – символ гиперболического тангенса.

Автором настоящей работы также были предложены подобные уравнения. При выводе первого из них [4] предполагалось, что

$$dE/dP = a (E_0 - E)^m. \tag{8}$$

После интегрирования (8) и определения параметров a и m была получена система уравнений

$$\begin{aligned} E &= P_1 \text{ при } P \leq P_1; \\ E &= E_0 - (E_0 - P_1)[(X_0 - P)/(P_0 - P_1)]^b \text{ при } P_1 \leq P \leq P_0; \\ E &= E_0 \text{ при } P \geq P_0, \end{aligned} \tag{9}$$

где P_1 – осадки, при которых начинается сток с данного речного бассейна; P_0 – осадки, при которых испарение становится равным испаряемости; $b = (P_0 - P_1)/(E_0 - P_1)$.

При выводе второго уравнения [5] предполагалось, что

$$E/dP = (1+P/E_0)[(E_0 - E)/E_0]. \tag{10}$$

После интегрирования было получено

$$E = E_0(1 - e^z), \tag{11}$$

где $z = P/E_0 + 0,5(P/E_0)^2$.

К сожалению, автору не удалось найти способов для определения значений P_1 и P_0 . Ввиду этого были сделаны два упрощения. Во-первых, по примеру

других уравнений стало считаться, что $P_1 = 0$; во-вторых, легко установить, что при $P = 2E_0$ уравнения (1) и (11) дают испарение, близкое к испаряемости: $E = 0,96E_0$ и $E = 0,98E_0$ соответственно, поэтому было принято, что $P_0 = 2E_0$. Эти допущения превратили систему уравнений (9) в очень простое уравнение [5]

$$E = P(1 - P/4E_0). \tag{12}$$

Результаты расчетов и их обсуждение

Если приведенные уравнения разделить на P , то появляется возможность сравнить определенные по ним коэффициенты испарения ($K_E = E/P$) в зависимости от переменной (E_0/P), которую принято называть индексом сухости [9], и таким образом получить некоторое представление о том, к каким результатам приводит применение того или иного уравнения при разных значениях (E_0/P). Значения K_E в зависимости от (E_0/P) для разных уравнений связи представлены в табл. 1. Уравнения различных авторов представлены в первой строке их номерами по настоящему тексту.

Таблица 1

Коэффициенты испарения, определенные по различным уравнениям связи

E_0/P	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(11)	(12)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,4	0,39	0,33	0,36	0,37	0,38	0,36	0,54	0,40	0,38
0,5	0,48	0,39	0,44	0,43	0,46	0,46	0,59	0,49	0,50
0,6	0,56	0,45	0,50	0,49	0,54	0,54	0,62	0,57	0,58
0,7	0,62	0,50	0,56	0,53	0,60	0,63	0,66	0,64	0,64
0,8	0,68	0,55	0,61	0,57	0,66	0,71	0,68	0,70	0,69
1,0	0,76	0,63	0,69	0,63	0,76	0,81	0,73	0,78	0,75
1,2	0,82	0,70	0,76	0,68	0,83	0,87	0,76	0,83	0,79
1,4	0,86	0,75	0,80	0,71	0,89	0,92	0,79	0,87	0,82
1,6	0,89	0,80	0,84	0,74	0,92	0,95	0,81	0,90	0,84
1,8	0,91	0,83	0,87	0,77	0,95	0,97	0,83	0,91	0,86
2,0	0,92	0,86	0,89	0,79	0,96	0,98	0,85	0,93	0,88
2,2	0,94	0,89	0,91	0,80	0,98	0,99	0,86	0,94	0,89
2,5	0,95	0,92	0,93	0,82	0,99	0,99	0,88	0,95	0,90
2,8	0,96	0,94	0,95	0,84	0,99	0,99	0,89	0,96	0,91
3,0	0,96	0,95	0,96	0,85	1,00	0,99	0,90	0,97	0,92
3,2	0,97	0,96	0,96	0,86	1,00	0,99	0,91	0,97	0,92
3,5	0,97	0,97	0,97	0,87	1,00	0,98	0,92	0,98	0,93
4,0	0,98	0,98	0,98	0,88	1,00	0,97	0,93	0,98	0,94

Данные табл. 1 показывают, что во всем диапазоне изменений отношения E_0/P уравнения Ольдекопа и автора (11) дают очень близкие результаты; применение уравнения Будыко преуменьшает значения K_E по сравнению с уравнениями (1), (5), (6) и (11); результаты расчета по уравнению Тюрка слабо согласованы с результатами по другим уравнениям. Кроме этого следует отметить, что при $E_0/P < 1$ уравнения Ольдекопа, Багрова (5), Малинина, автора (11) и (12) дают

близкие значения K_E , различающиеся на немногие сотые доли, а при $E_0/P > 1$ результаты расчета K_E заметно различаются между собой, тесная согласованность наблюдается только между уравнениями (1) и (11). Можно также сказать, что при $E_0/P < 1$ вычисления по (11) и (12) дают почти одинаковые значения K_E .

В настоящей работе предпринимается попытка сравнить результаты расчета норм годового испарения по некоторым из перечисленных уравнений на значительной части обширной территории бывшего Советского Союза. Для этой цели были использованы данные по осадкам и температуре воздуха, приведенные в работе [6], по сорока восьми административным единицам РФ, а также по отдельным сопредельным странам с преимущественно равнинной территорией. Испаряемость для всех уравнений, кроме уравнения Будыко, рассчитывалась по формуле, предложенной автором [6]:

$$E_0 = 16,8(0,8 + 0,011t_n)[90 - 52\exp(0,11(6 - t_n))] \text{ мм}, \quad (13)$$

где t_n представляет собой сумму месячных норм температуры воздуха (t_i) за теплый период года, деленную на 12, т. е. на число месяцев в году ($t_n = \sum t_i/12$). Деление на 12, т. е. на одно и то же число для всех пунктов, а не на число месяцев в теплом периоде, делает характеристику температуры теплого периода в разных пунктах более сравнимой. Для зон, где температура воздуха положительна во все месяцы года, величина t_n совпадает с нормой годовой температуры воздуха. При этом к теплому периоду относятся месяцы с неотрицательной нормой температуры. Для уравнения (3) испаряемость определяется согласно действующим Рекомендациям по расчету испарения с поверхности суши [8] по равенству, установленному Будыко в середине прошлого столетия

$$E_0 = R/L, \quad (14)$$

где R – радиационный баланс увлажненной подстилающей поверхности; $L = 25 \cdot 10^5$ Дж/кг – удельная теплота испарения. В более поздних его работах (см., например, [1]) приводится методика определения испаряемости комплексным методом, которая здесь не применялась, т. к. нам хотелось проверить, какие результаты дает уравнение (3) при использовании для расчета радиационного баланса уравнения (15). Равенство (14) допускает, что на максимально возможное испарение могут быть израсходованы все тепловые ресурсы территории, т. е. возможна тепловая машина с кпд, равным единице, но это противоречит второму началу термодинамики. Поэтому значения E_0 , полученные таким способом, по нашему мнению, должны быть преувеличенными. В работе автора [6] для определения R было предложено и апробировано полуэмпирическое уравнение

$$R = 41,9 [90 - 52\exp(0,11(6 - t_n))] \text{ МДж/м}^2\text{год}, \quad (15)$$

которое и было использовано для определения испаряемости при работе с уравнением (3). Среднеквадратическая погрешность оценки R составляет $s = 3,9$ МДж/м²год при коэффициенте детерминации $r^2 = 0,954$.

Исходные данные и результаты расчета испарения приведены в табл. 2. Результаты расчета сравнивались с данными карт по испарению, опубликованных в [8] (карта 1) и в [7] (карта 2), относительно которых определялись погрешности расчета в процентах. Обе карты были построены в Государственном гидрологическом

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета испарения

Территория, республика, область	$t_{п,с}$	P , мм	E_1 , мм	E_2 , мм	Испарение по уравнениям, мм					
					(1)	(3)	(5)	(6)	(11)	(12)
Латвия	6,8	730	527	500	514	500	506	541	526	516
Белоруссия	7,5	740	550	575	542	524	537	572	554	539
Украина										
север	8,3	610	500	575	502	486	512	536	510	485
юг	10,4	475	425	475	435	427	453	463	437	413
Российская Федерация										
Европейская часть										
Области										
Архангельская										
север	3,3	640	300	300	275	290	264	253	279	276
юг	5,3	680	450	425	431	427	418	439	442	443
Кировская	6	680	500	500	466	456	456	490	477	471
Ленинградская	5,9	740	475	450	477	469	463	489	489	488
Новгородская	6,3	730	500	475	493	482	482	518	505	500
Вологодская	5,8	710	475	450	464	457	452	481	476	474
Тверская	6,3	745	500	525	497	487	485	522	509	506
Костромская	6	730	500	475	479	471	467	498	491	489
Московская	6,5	720	500	525	499	487	490	524	511	503
Рязанская	7,1	650	500	525	494	480	494	524	504	487
Смоленская	6,3	790	500	550	509	499	494	522	521	521
Брянская	7,4	725	500	575	533	516	529	563	545	530
Воронежская	8,3	660	500	550	528	510	534	562	537	513
Белгородская	7,5	625	500	550	494	478	498	525	502	482
Пермская	5,7	740	475	450	466	460	452	473	478	479
Саратовская	8,1	545	475	475	462	449	474	494	468	443
Волгоградская	9,2	478	400	475	429	421	447	459	433	407
Ростовская	9,6	550	450	475	482	470	500	517	487	460
Республики										
Карелия	4,5	670	425	400	379	382	365	368	388	396
Коми	4	700	375	325	343	354	329	322	350	357
Удмуртская	6,2	630	475	500	458	447	453	483	468	456
Татарская	6,8	610	475	475	469	456	470	497	478	461
Башкортостан	6,7	610	475	450	466	453	466	494	475	459
Калмыцкая	10	395	400	375	370	366	385	390	371	350
Азиатская часть										
Западная Сибирь										
Ямало-Ненецкий автономный округ										
север	2	400	100	100	127	141	124	115	128	87
юг	3,7	600	350	300	309	318	297	293	316	323
Ханты-Мансийский автономный округ	5,4	520	450	375	388	380	386	410	396	384
Омская обл.	6,2	445	450	400	372	365	381	398	378	358

Территория, республика, область	$t_{п,^{\circ}C}$	$P,$ мм	$E_1,$ мм	$E_2,$ мм	Испарение по уравнениям, мм					
					(1)	(3)	(5)	(6)	(11)	(12)
Восточная Сибирь										
Таймырский авто- номный округ										
север	2,2	355	150	150	150	160	144	137	152	148
юг	2,8	560	250	250	221	237	213	201	223	210
Эвенкийский авто- номный округ										
север	3,3	410	300	300	252	255	244	253	259	261
юг	4,2	460	400	350	317	314	311	334	325	320
Южная часть Красноярского края	5,5	490	410	350	379	371	380	402	386	372
Иркутская обл.	4,9	400	300	300	320	314	323	340	325	311
Республика Саха (Якутия)										
север	2,2	435	150	150	152	166	147	137	152	125
центр	3,6	270	225	250	219	216	222	233	222	212
юг	4,7	340	300	275	283	279	290	302	287	273
Читинская обл	5	460	300	300	350	344	350	371	357	345
Дальний Восток										
Амурская обл.	6	600	450	350	440	429	436	465	449	437
Хабаровский край										
север	6	600	450	350	299	307	287	282	305	313
юг	6	600	450	350	525	509	518	553	537	524
Приморский край	7,9	850	475	450	592	572	582	624	606	596
Магаданская обл.	3,3	510	250	225	267	274	256	253	272	279
Чукотский авт. округ	2,6	510	175	175	198	213	191	181	200	186
Камчатка										
север	3,4	793	300	200	290	311	280	154	292	255
юг	3,8	846	425	200	329	351	319	335	335	314
Сахалин										
север	5,2	800	450	350	592	572	582	624	606	596
юг	6,6	910	500	500	267	274	256	253	272	279
Казахстан										
север	7,4	365	355	345	333	330	347	354	335	315
юг	10,3	300	260	225	289	289	298	296	290	275
Среднее 1, мм			400	386	393	391	390	406	403	392
ОП1,%					7,1/11,3	7,8/12,5	8,9/9,5	8,7/10,9	7,0/11,8	7,6/11,9
Среднее 2, мм			410	411	400	394	397	415	408	396
ОП2,%						7,1/7,5	7,4/6,5	8,2/6,9	6,2/6,5	6,3/7,6

Примечания. E_1 и E_2 – испарение по данным карт 1 и 2 соответственно; среднее 1 и ОП1 – соответственно, среднее значение испарения и средняя относительная погрешность его определения по тому или иному уравнению по всей рассматриваемой территории; среднее 2 и ОП2 – то же, что и перед этим, но для территории без Дальнего Востока и Казахстана; значения ОП определены относительно данных карты 1 (числитель) и карты 2 (знаменатель).

институте, испарение для них определялось как разность между атмосферными осадками, определенными с поправками на недоучет измерительных приборов, и речным стоком. В данной работе использованы осадки (P) с поправками на смачивание и ветровое выдувание, заимствованные из Справочника по климату СССР, обобщившем материалы наблюдений на уровень 1960 г.

Анализ результатов показывает, что для расчета норм годового испарения на территории России и ряда сопредельных стран, рельеф которых преимущественно равнинный, пригодны все, представленные в табл. 2, уравнения связи, т. к. все они позволяют определить средние значения испарения (среднее 1), достаточно близкие к данным как первой, так и второй картам, т. е. их использование не приводит, в среднем, к непозволительно большим систематическим погрешностям. Относительные погрешности расчета (ОП1) при сравнении с данными первой карты составляют 7–8 %, а при сравнении с данными второй карты – 10–12 %. Такие оценки расчета, учитывая, что и сами карты построены с некоторыми погрешностями, по-видимому, можно признать вполне допустимыми. Заметные расхождения в оценках по данным двух карт в основном объясняется тем, что на второй из них испарение на территории Дальнего Востока повсеместно заметно скорректировано в сторону уменьшения по сравнению с первой картой.

Испарение при построении карт определялось как разность между нормами осадков и речного стока. Таким образом, благодаря этой разности всего за 6 лет (время между публикациями карт) на карту испарения были внесены едва ли оправданные существенные изменения. Так, например, трудно объяснить, почему на второй карте испарение в северных частях Камчатки и Сахалина больше, чем в их южных частях. Поэтому испарение на территории Дальнего Востока, представленное на второй карте, вызывает некоторое сомнение. В табл. 2 также приводятся средние значения испарения (среднее 2) и относительные погрешности, полученные при применении уравнений без учета территорий Дальнего Востока и Казахстана (ОП2). Здесь наблюдается практическое совпадение относительных погрешностей (6–8 %) по всем уравнениям относительно и первой и второй карт, наилучшие приближения по средним значениям испарения здесь дают уравнения (6) и (11), остальные уравнения незначительно (на 3–5 %) их занижают.

Удовлетворительные оценки расчета норм испарения говорят также о том, что испаряемость и радиационный баланс рассчитываются по уравнениям (13) и (15) также удовлетворительно, и эти уравнения могут применяться по своему назначению, по крайней мере, на рассмотренной территории. Надо отметить, что дальнейшие исследования автора показали невозможность применения (13) и (15) при $t_n \leq 2$ °С, когда они дают заниженные значения и должны быть заменены, соответственно, на уравнения

$$E_0 = 16,8(0,8 + 0,011t_n)(4,73t_n + 8,6) \text{ мм}; \quad (16)$$

$$R = 41,9(4,73t_n + 8,6) \text{ МДж/м}^2\text{год}. \quad (17)$$

Уравнение (17) получено в результате сопоставления данных по радиационному балансу увлажненной территории [6] и данных по t_n для территории бывшего СССР. Среднеквадратическая погрешность оценки R составляет $s = 4,0$ МДж/м²год при коэффициенте детерминации $r^2 = 0,931$.

Выводы

1. Анализ коэффициентов испарения, определенных по рассматриваемым уравнениям, показывает, что большинство из них при $E_0/P \leq 1$ (зоны достаточного и избыточного увлажнения) при расчете коэффициентов испарения (испарения) дают очень близкие результаты, а при $E_0/P \geq 1$ результаты расчета заметно различаются. Такой вывод справедлив при условии, что испаряемость при использовании каждого уравнения определяется одинаковым способом.

2. Расчет среднего многолетнего испарения с части территории бывшего Советского Союза по шести из рассмотренных уравнений приводит примерно к одинаковым результатам с относительной погрешностью около 10 %. Если при этом не учитывать территорию Дальнего Востока, то относительная погрешность снижается до 6–8 %. Показано, что наиболее точные оценки среднемноголетнего испарения дают уравнения В.Н. Малинина (6) и автора (11).

3. Небольшие, вполне допустимые погрешности расчета позволяют надеяться на возможность использования уравнений (13) и (15) для определения, соответственно, испаряемости и радиационного баланса увлажненной поверхности, хотя бы для рассмотренной территории.

Литература

1. Будыко М.И. Климат и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 470 с.
2. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Гурьянов Л.А. Малопараметрическая модель увлажнения Северо-Западного региона России для условий современных изменений климата // Учен. зап. РГТМУ, 2014. № 36. – С. 37–49.
3. Методы изучения и расчета водного баланса. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 396 с.
4. Постников А.Н. Одна из форм уравнения связи элементов водного баланса // Труды ГТИ, 1990. Вып. 338. – С. 48–54.
5. Постников А.Н. К оценке среднемноголетних значений суммарного испарения с поверхности суши на основе уравнений связи // Тр. РГТМУ, 1999. Вып. 123. – С. 141–152.
6. Постников А.Н. Формулы для расчета среднего годового испарения с поверхности суши и радиационного баланса увлажненной поверхности // Пробл. совр. гидрологии; сб. научн. тр. гидрол-го фак-та РГТМУ, 2004. – С. 143–153.
7. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 96 с.
8. Указания по расчету испарения с поверхности суши (проект). – Фотоофсетная лабор. ВНИГЛ ГТИ, 1970. – 133 с.
9. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 567 с.