

Т. Н. Федорович

ОПЫТ РАСЧЕТА ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНОГО БАССЕЙНА

С 1966 г. в Управлении гидрометеорологической службы БССР производится расчет водного баланса р. Березины до Бобруйска. Это — часть большой работы, выполняемой гидрометслужбой по плану Международного гидрологического десятилетия.

Составление текущих водных балансов позволяет уточнить взаимосвязь между основными элементами баланса и факторами, их обуславливающими, оценить приход и расход влаги на водосборе, запасы воды в бассейне и их изменение в связи с хозяйственной деятельностью человека. В перспективе эта работа должна способствовать уточнению методов долгосрочных гидрологических прогнозов.

В данной статье рассматриваются способы и точность расчета составляющих, входящих в уравнение водного баланса вида:

$$X = Y + E + X_a + \Delta W + \Delta U + P,$$

где X — осадки, выпавшие на поверхность водосбора; Y — суммарный сток в замыкающем створе; E — суммарное испарение с поверхности почвы снега и растительности; X_a — запас воды в снеге; ΔW — изменение запаса влаги в верхнем слое почвогрунтов; ΔU — изменение запаса подземных вод; P — невязка водного баланса, включающая водообмен с другими бассейнами и ошибки определения всех составляющих баланса.

Бассейн р. Березины до Бобруйска (площадь водосбора 20 300 км²) находится в зоне избыточного увлажнения. Большая часть водосбора занята Центрально-Березинской равниной, лишь на западе и северо-западе расположена Минская возвышенность, являющаяся частью Белорусской гряды. Средняя высота водосбора 189 м. Наибольшая высота достигает 350 м, наименьшая 130 м. Густота гидрографической сети 0,20 км/км². Около 30% поверхности водосбора занято пашней, 54% — лесом (сухим и заболоченным), 7% — болотами и менее 1% — озерами. Девонские отложения, представленные известняками, доломитами и мергелями, к югу от Борисова перекрыты отложениями меловой системы. Четвертичные отложения, образующие современный рельеф бассейна, относятся к ледниковым и послеледниковым периодам. Почвы песчаные. Наиболее распространены средне- и слабоподзолистые, дерново-песчаные, реже — суглинистые.

Важнейшим условием формирования баланса является степень увлажненности бассейна, зависящая от режима осадков.

Осадки на водосборе рассчитывались по 29—22 станциям и постам. Вводились поправки на смачивание и ветровой недоучет по методике Государственного гидрологического института (ГГИ) и Главной геофизической обсерватории (ГГО) [1, 2]. Поправка на испарение в связи с переходом в 1966 г. на четырехсрочные наблюдения оказалась малой и составила за период май—октябрь рассматриваемого года 1,8—0,5 мм.

Величины поправочного коэффициента на ветровой недоучет с 1966 по 1969 г. и за многолетний период приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Величины поправочного коэффициента на ветровой недоучет к осадкам

Год	Месяц												Средняя за год	Общая за год (смачивание + ветровой недоучет)
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
1966	1,46	1,27	1,21	1,07	1,05	1,04	1,05	1,04	1,06	1,08	1,17	1,44	1,16	—
1967	1,40	1,46	1,25	1,17	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,07	1,12	1,30	1,16	1,21
1968	1,29	1,34	1,23	1,09	1,03	1,04	1,04	1,03	1,04	1,10	1,16	1,34	1,14	1,20
1969	1,35	1,55	1,30	1,09	1,05	1,03	1,04	1,04	1,04	1,08	1,17	1,30	1,17	1,21
Средний многолетний период	1,48	1,47	1,34	1,07	1,03	1,02	1,02	1,02	1,04	1,06	1,22	1,39	1,18	1,21

Осадки для водосбора рассчитаны как средние арифметические с ошибкой за счет осреднения $\pm 3\%$ за сезон [3]. Многолетние суммы осадков приводятся для рядов 60—70 лет.

Сток. Величины средних месячных расходов получены по гидрометрическим данным. Многолетние данные по суммарному стоку взяты по справочнику [4], где годовая величина определена по 74-летнему ряду со средней квадратической ошибкой $\pm 2\%$. Подземная составляющая принята по данным ГГИ [5].

Испарение с поверхности суши. Из трех пунктов, где ведутся наблюдения над испарением на территории БССР (Шарковщина, Русиновичи, Василевичи), один расположен на водосборе.

До 1967 г. испарение определялось с культур, имеющих в сельском хозяйстве БССР второстепенное значение. Кроме того, данных одного испарителя явно недостаточно для вычисления этой составляющей водного баланса, поэтому она рассчитывалась по методу Константинова—Кузнецова (со средней ошибкой порядка 10—15%). За период 1966—1969 г. измеренные с помощью испарителей величины отличались от рассчитанных в 60% случаев не более чем на $\pm 30\%$, в отдельные месяцы на 70—80% (два случая). Средние многолетние величины испарения определялись несколькими способами [6]. Предпочтение отдано комплексному методу (ошибка 23—27%), дающему результаты, близкие к тем, что получены по водному балансу.

Испарение с леса принято равным испарению с поля, хотя, как известно, разница в испарении с луга и леса зависит от состава и полноты насаждений и в среднем составляет 2—10%.

Запасы воды в снеге определяются на водосборе по 15 пунктам. В 9 из них наблюдения ведутся в поле и в лесу. Для учета снегозапасов в лесу в остальных пунктах определялся переходный коэффициент. Для 1965—1966 гг. $K=1,2$; 1966—1967 гг. $K=1,0$; 1967—1968 гг. $K=1,0$; 1968—1969 гг. $K=1,1$. Для многолетнего периода $K=1,1$.

Величина снегозапасов определена как средняя взвешенная с учетом площади, занятой полем и лесом в районе каждого пункта. Точность определения этой составляющей при плотности сети один пункт на 1350 км² обеспечивает в 75% случаев ошибку, равную $\pm 4\%$ при равноценной полноте освещения запасов в поле и в лесу (графики Л. К. Вершининой) [7]. При вычислении многолетнего запаса использо-

вался 22-летний ряд наблюдений. Запас воды в ледяной корке учитывался по данным наблюдений на водосборе за последние шесть лет путем введения поправочного коэффициента, равного 1,18.

Запасы продуктивной влаги в верхнем метровом слое почвогрунтов определялись по данным шести пунктов, один из которых находится за пределами водосбора.

В период вегетации, когда влагозапасы зависят и от характера подстилающей поверхности, измерения велись на 26—28 сельскохозяйственных полях с наиболее распространенными для данной территории культурами; до начала вегетации и после нее — на полях с озимыми культурами. Средние взвешенные запасы влаги для района каждой станции вычислялись с учетом площадей, занятых каждой культурой.

Определение изменений запасов влаги за зиму и весну было затруднительно из-за отсутствия наблюдений. В зиму 1965—1966 г. величина влагозапасов взята по средним многолетним данным, в 1966—1967 гг. — по январским влагозапасам, так как оттепелей было мало и почвогрунты промерзли на значительную глубину, с зимы 1968 г. — по измерениям.

Величина влагозапасов для водосбора из-за равномерного расположения пунктов наблюдений определялась как средняя арифметическая. Изменения влагозапасов за летне-осенний сезон в 80% случаев определены с ошибкой 20—25%. Чтобы довести ошибку до 15% при данной вариации влагозапасов, понадобилось бы 13 пунктов, до 10% — 26 пунктов.

В 1969 г. число пунктов определения влагозапасов доведено до 9.

За многолетний период изменение запасов влаги для бассейна вычислено как среднее арифметическое из 14-летнего ряда наблюдений на полях с озимыми и 8-летнего на полях с яровыми культурами. Величины изменения влагозапасов за зимний и весенний периоды определены приближенно с учетом тенденции изменения их в северо-западном районе Европейской территории Союза.

Учет изменения запасов грунтовых вод производился по шести скважинам в четырех пунктах, один из которых расположен за пределами бассейна. В расчете использованы скважины, вскрывающие первый безнапорный водоносный горизонт. Коэффициент водоотдачи принимался по [8] и данным Белорусской гидрогеологической станции в зависимости от состава грунтов и колебался от 0,06 до 0,25.

Из-за недостаточного количества скважин были привлечены данные наблюдений по колодцам бытового водопользования. Коэффициент водоотдачи принят осредненный: для суглинков 0,05, супесей 0,10, песков 0,20.

Изменение запасов грунтовых вод в бассейне определялось как среднее арифметическое из данных скважин и бытовых колодцев. Средние многолетние изменения вычислены по данным скважин за четыре года.

Подробнее расчет отдельных элементов баланса изложен в работе [6].

Анализ водного баланса. Водный баланс р. Березины до Бобруйска за многолетний период рассчитывался не как средняя величина из ряда лет, а как осредненные данные по рядам наблюдений разной продолжительности. Самый короткий ряд был использован при определении изменения запаса грунтовых вод.

Отсутствие баланса за длительный ряд лет не позволяет определить, в каких пределах меняются такие важнейшие составляющие его, как испарение и бассейновые запасы влаги из года в год и в годы, экстремальные по стоку и осадкам. При условии отсутствия систематических

ошибок при определении отдельных элементов баланса путем осреднения невязки P за год или в отдельные сезоны за длительный ряд лет можно получить величину подземного водообмена данного бассейна с другими бассейнами, так как суммарная величина погрешности расчета баланса при осреднении становится весьма малой или равной нулю [9].

Средняя многолетняя величина осадков по бассейну составляет 766 мм и имеет довольно равномерное распределение внутри года с максимумом летом (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Средние многолетние величины основных элементов водного баланса р. Березина — Бобруйск (площадь водосбора 20 200 км²)

Элементы водного баланса	Обозначения	Величина, мм					Отклонение, % от годовой величины			
		зима (XII—II)	весна (III—V)	лето (VI—IX)	осень (X—XI)	год (XII—XI)	зима (XII—II)	весна (III—V)	лето (VI—IX)	осень (X—XI)
А. Приход осадки	$A = X$	164	163	322	117	766	21,4	21,3	42,0	15,3
Б. Расход										
речной сток;	$У$	30	87	44	25	186	16,1	46,8	23,7	13,4
поверхностный	$У_{\text{п}}$	—	—	—	—	107	—	—	—	—
подземный	$У_{\text{г}}$	—	—	—	—	79	—	—	—	—
испарение	E	10	182	354	37	583	1,7	31,2	60,7	6,4
Всего расход	$B = У + E$	40	269	398	62	769	5,2	35,0	51,8	8,0
В. Изменение влагозапасов в бассейне	$B = A - B$	124	-106	-76	55	-3				
а) всего на поверхности и в снежном покрове	$\Delta V = X_a$	70	-70	0	0	0				
б) всего в почвенно-грунтовой толще: по водному балансу по измерениям	$\Delta V' = A - B - \Delta V$ $\Delta V'' = \Delta W + \Delta U$	54	-36	-76	55	-3				
		(34)	(-15)	-44	20	-5				
В том числе; в верхнем слое почвогрунтов	ΔW	(43)	(-60)	-3	20	0				
в подземных водах	ΔU	-9	45	-41	0	-5				
Невязка водного баланса	$P = \Delta V' - \Delta V''$	20	-21	-32	35	2				
	$\delta = \frac{P}{X} \%$	12	-13	-10	30	0				

Слой стока за год равен 186 мм или 24% от осадков. Большая часть его (47% от годовой величины) приходится на весенний сезон. Наиболее низкий сток наблюдается осенью и зимой. Зимой формирование его происходит как за счет разгрузки грунтовых вод, так и за счет зимних оттепелей.

Доля подземного стока от суммарного составляет 42%. Испарение за год равно 583 мм, или 76% от осадков, и распределяется в году весьма неравномерно, составляя летом 61%, а зимой лишь 2% от годовой величины. Запасы воды в снеге составляют 70 мм или 43% от зимних осадков.

Почвогрунты накапливают влагу в осенне-зимний период (63 мм) и отдают ее на испарение весной и летом. Максимальное накопление

влаги в почвогрунтах характерно для зимнего сезона. Весной влагозапасы уменьшаются (60 мм) за счет отдачи влаги из верхних оттаивающих слоев в нижележащие и возрастающего испарения. Летом происходит дальнейшее уменьшение запасов влаги, а осенью — накопление в результате уменьшения испарения.

Рассматривая долю участия бассейновой аккумуляции ($\Delta W + \Delta U$) в формировании стока и испарения по отдельным сезонам, можно сделать следующие выводы:

1) так как зимой происходит испарение только с поверхности снега, бассейновые запасы на эту составляющую баланса не расходуются;

2) весной расходование бассейновых запасов влаги происходит на испарение, так как сток в этот период формируется только за счет талых и дождевых вод;

3) летом выпавших осадков не хватает на покрытие расхода, на сток и испарение, поэтому бассейновые запасы уменьшаются (на 44 мм, или 14% от осадков). Основная часть при этом расходуется из грунтовых вод, т. е. бассейновые воды летом расходуются в основном на сток. По-видимому, участие составляющей ΔW в бассейновых запасах влаги занижено, так как испарение летом происходит за счет изъятия влаги из верхнего слоя почвогрунтов;

4) осенью осадки не только обеспечивают сток и испарение, но и восстанавливают потери влаги в бассейне за летний период, что происходит за счет изменения запасов влаги в верхнем слое почвогрунтов. При этом пополнение грунтовых вод незначительно.

Несмотря на то что невязка в целом за год оказалась равной 2 мм, за отдельные сезоны она недостаточно мала из-за неточности вычисления отдельных составляющих баланса, в частности, при уменьшения ΔW летом и ΔU осенью.

В табл. 3 приведены составляющие баланса за отдельные годы. Как видно, близкими по осадкам были 1966, 1967, 1968 и 1969 гг.

В течение 1966 и 1967 гг. осадки выпадали в пределах нормы (760 и 765 мм), хотя распределение их внутри года было несколько иным. Так, в летний сезон осадков выпало меньше средних многолетних соответственно на 66 и 89 мм, или 80 и 72% от сезонной нормы осадков. Несколько больше нормы были осадки зимой и весной 1965—1966 г. (соответственно на 15 и 17%) и весной и осенью 1966—1967 г. (соответственно на 24 и 31%).

Расход осадков на сток оказался равным: 1966 г. по стоку был выше нормы на 10%, а 1967 г. — ниже на 8%, т. е. при одном и том же количестве выпавших осадков доля участия их в образовании стока была различной. Уменьшение стока в 1967 г. на 33 мм по сравнению с 1966 г. произошло в основном за счет более низкой величины его за весенний сезон (89 мм против 118 мм в 1966 г.). Увеличение стока в 1966 г. объясняется не столько меньшей величиной испарения, сколько меньшей бассейновой аккумуляцией (30 мм против 89 мм). В летний период рассматриваемых лет сумма стока и испарения оказалась одинаковой (336 и 333 мм). При большем количестве выпавших осадков в 1966 г. (на 23 мм) следовало ожидать меньшего расхода бассейновых запасов влаги на покрытие дефицита расходной части баланса. Действительно, в 1966 г. $\Delta V'' = -50$ мм, в 1967 г. $\Delta V'' = -99$ мм.

В 1968 и 1969 гг. суммы выпавших осадков составили 675 и 680 мм, что меньше нормы на 12 и 11%. При одной и той же величине испарения 1968 г. по стоку был в пределах нормы, а обеспеченность 1969 г. составила 90%, что характерно для маловодного года. Увлажнение бассейна в первом случае было таково, что изменение запаса бассейновых

Величины элементов водного баланса за отдельные годы р. Березина — Бобруйск

Элементы водного баланса	Обозначения	1966					1967					1968					1969				
		зима	весна	лето	осень	год	зима	весна	лето	осень	год	зима	весна	лето	осень	год	зима	весна	лето	осень	год
А. Приход осадки	$A = X$	189	190	256	125	760	177	202	233	153	765	152	178	220	125	675	120	118	279	163	680
Б. Расход																					
речной сток	$У$	29	118	38	20	205	26	89	36	21	172	28	97	36	21	182	22	57	37	24	140
испарение	E	12	181	298	36	527	9	186	297	52	544	7	164	286	21	478	8	154	282	33	477
Всего расход	$B = У + E$	41	299	336	56	732	35	275	333	73	716	35	261	322	42	660	30	211	319	57	617
В. Изменение влагозапасов в бассейне	$B = A - B$	148	-109	-80	69	28	142	-73	-100	80	49	117	-83	-102	83	15	90	-93	-40	106	63
а) всего на поверхности в снежном покрове	$\Delta V = X_a$	82	-102	0	0	-20	111	-111	0	0	97	-103	0	0	-6	71	-71	0	0	0	
б) всего в почвенно-грунтовой толще:																					
по водному балансу	$\Delta V' = A - B - \Delta V$	66	-7	-80	69	48	31	38	-100	80	49	20	20	-102	83	21	19	-22	-40	106	63
по измерениям	$\Delta V'' = \Delta W + \Delta U$	(49)	(-22)	-50	53	30	22	83	-99	83	89	20	-31	-92	103	0	55	-105	-41	122	31
В том числе:																					
в верхнем слое почвогрунтов	ΔW	(43)	(-60)	-10	43	16	(38)	(35)	-70	68	71	46	-81	-60	108	13	72	-138	-29	115	20
в подземных водах	ΔU	6	38	-40	10	14	-16	48	-29	15	18	-26	50	-32	-5	-13	-17	33	-12	7	11
Невязка водного баланса	$P = \Delta V' - \Delta V''$	17	15	-30	16	18	9	-45	-1	-3	-40	0	51	-10	-20	21	-36	83	1	-16	32
	$\delta = \frac{P}{X} \%$	9	8	-12	13	2	5	-22	0	-2	-5	0	29	-5	-16	3	-30	70	0	-10	5

вод не произошло, в то время, как в 1969 г. они увеличились на 31 мм.

Приведенный расчет водного баланса речного бассейна показывает, что, несмотря на погрешности определения отдельных составляющих баланса, имеющиеся сейчас в достаточном объеме метеорологические и гидрологические данные позволяют рассчитать все составляющие баланса, исследовать их годовой ход, определить взаимное влияние отдельных элементов. Такие расчеты могут оказаться полезными для решения ряда теоретических и практических задач.

Определение изменения запаса влаги в почвогрунтах и грунтовых вод требует повышения точности расчета.

Литература

1. Временные указания по введению поправок в месячные суммы осадков при расчетах водных балансов речных бассейнов. Валдай, 1967. 2. Методические указания к четвертой части Справочника по климату СССР. Разд. 2. Атмосферные осадки. Введение поправок на недоучет осадков осадкомером. Л., 1966. 3. В. С. Голубев. Методы оценки и расчета сезонных и годовых сумм осадков на водосборах и суточных сумм осадков на сельскохозяйственных полях. Сб. «Материалы семинара по расчетам водного баланса речных бассейнов и организации комплексных воднобалансовых и агрометеорологических наблюдений». Валдай, 1966. 4. Ресурсы поверхностных вод СССР. т. 5, ч. II. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Л., 1966. 5. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л., 1967. 6. Т. Н. Федорович. Расчет водного баланса бассейна р. Березины до Бобруйска. Сб. «Материалы семинара по расчетам водного баланса речных бассейнов». Валдай, 1967. 7. О. И. Крестовский, Н. И. Капотова, А. А. Капотов. Методы учета изменения запасов воды на поверхности водосборов в почвогрунтах зоны аэрации и запасов грунтовых вод. Сб. «Материалы семинара по расчетам водного баланса речных бассейнов и организации комплексных воднобалансовых и агрометеорологических наблюдений». Валдай, 1966. 8. Методические указания управлениям гидрометслужбы (№ 73). Валдай, 1966. 9. О. И. Крестовский. Результаты расчётов сезонных и годовых водных балансов некоторых водосборов ВНИГЛ. Сб. «Материалы семинара по расчетам водного баланса речных бассейнов». Валдай, 1967.