

МИРОВЫЕ РЕСУРСЫ ПРЕСНЫХ ВОД

Профессор
М. И. ЛЬВОВИЧ

Водные ресурсы Земли слагаются из стационарных запасов воды и запасов, возобновляемых в процессе ее круговорота. Общий объем стационарных запасов достигает почти 1,5 млрд км³, из которых на долю доступной для использования пресной воды, включая подземную, озерную, речную, а также почвенную влагу и пары атмосферы, приходится, по нашим подсчетам, всего 4—5млн км³, или 0,3% объема гидросферы. Из этих цифр как будто следует вывод о бедности Земли ресурсами пресных вод. Но нужды человечества лишь в небольшой мере обеспечиваются за счет этих запасов. Самым надежным и постоянным источником служит вода, возобновляемая в процессе такого грандиозного явления, как круговорот. Вот почему в учете ресурсов пресных вод основным является метод водного баланса, позволяющий количественно осмыслить круговорот и его отдельные звенья, а также оценить непрерывно возобновляемые ресурсы пресных вод.

Предложенное нами понятие об активности водообмена, характеризующее продолжительность смены всего объема воды данной части гидросферы в процессе круговорота, позволяет раскрыть важные и интересные закономерности этого явления (табл. 1). Активность обмена соленых частей гидросферы — океана и глубинных подземных вод, основной объем которых составляют рассолы, — исчисляется тысячелетиями. С другой стороны, сопоставление отдельных частей стационарных запасов гидросферы с соответствующими элементами водного баланса показывает, что наиболее ценные для людей ресурсы пресной воды при весьма малых стационарных запасах отличаются исключительной динамичностью. Так, общий единовременный запас воды в руслах всех рек сравнительно с другими частями гидросферы очень мал и не превышает 1200 км³ (объем всех озерных вод 230 тыс. км³, подземных — 60 млн км³), а мировой речной сток составляет более 38 тыс. км³ в год. Из этого следует, что смена воды в речных руслах происходит 32 раза в течение года, или каждые 12 суток. На полную же смену подземных вод требуется около 5 000 лет. Следовательно, обмен речных вод происходит на пять порядков активней подземных. По этой причине речные воды почти повсеместно пресные, а большая часть глубинных подземных вод до предела насыщена солями. Исключение представляют ледники (в данном случае мы также имеем дело с пресной водой, только законсервированной в виде льда), активность водообмена которых весьма мала — полный цикл его свыше 8000 лет.

Приведенные общие сведения о свойствах гидросферы лежат в основе теоретических исследований водных ресурсов. Однако для успешного решения проблем в этой области необходимо глубже и подробнее знать тер-

риториальное распределение ресурсов пресных вод. Этой цели служат карты элементов водного баланса.

Начало изучению мирового водного баланса было положено еще в начале этого века нашим соотечественником Э. Я. Брикнером (1905), разработавшим систему уравнений для расчетов водного баланса крупных частей земного шара. В последующем появилось не менее 12 вариантов расчетов мирового водного баланса, различающихся по методам учета ресурсов пресных вод. Одни исследователи (Р. Фришче, 1906; Г. Вюст, 1922; И. Марчинек, 1964) вычисляли речной сток по 5- и 10-градусным широт-

Таблица 1

Запасы воды на Земле и активность водообмена

Части гидросферы	Объем, тыс. км ³	Активность водообмена (полное возобновление запасов), число лет
Мировой океан	1 370 323	2600
Подземные воды	60 000	5000
(в том числе зоны активного водообмена)	4 000	340
Ледники	24 000	8200
Озера	230	3
Почвенная влага	83	1
Пары атмосферы	14	0,038
Речные воды	1,2	0,031
Вся гидросфера	1 454 651	2750

ным поясам, обобщая для каждого из них все имеющиеся данные по речному стоку, другие (М. И. Будыко, 1956; Л. И. Зубенок, 1956, 1970; Ф. Альбрехт, 1961) за основу принимали испарение (если его вычесть из осадков, можно получить приближенное представление о речном стоке), третьи (М. И. Львович, 1945, 1960, 1964) исходили из впервые составленных (и впоследствии уточнявшихся) мировых карт речного стока.

Все работы по водному балансу, в том числе и мировому, прежде строились на уравнении $P = R + E$ (осадки равны речному стоку и испарению). Это уравнение создало целую эпоху в гидрологии, поскольку в течение семи-восьми десятилетий служило основой воднобалансовых исследований речных бассейнов и территории вообще, но оно отражает взаимосвязь только трех элементов водного баланса, что современную науку уже не удовлетворяет.

В прошлом году в Институте географии Академии наук СССР под руководством автора данной статьи и при участии Н. Н. Дрейер, Г. Я. Карасик, Г. М. Николаевой, Г. М. Черногаевой были завершены работы по водному балансу материков земного шара. В основу исследований была положена предложенная нами (1959) система дифференцированных уравнений:

$$R = U + S; P = U + S + E; W = P - S = U + E;$$

$$K_U = \frac{U}{W}; K_E = 1 - K_U = \frac{E}{W},$$

где R — полный речной сток, U — подземный и S — поверхностный (паводочный) сток в реки, P — атмосферные осадки, E — испарение, W — валовое увлажнение территории, K_U и K_E — коэффициенты питания рек подземными водами и испарения.

Система дифференцированных уравнений отличается от использовавшихся раньше увеличением числа элементов водного баланса с трех до шести, включая генетически разнородные части речного стока, представляющие различную практическую ценность и определяемые путем анализа

внутригодового хода стока, позволяющего выделить сток подземного происхождения. С помощью расчетов на основе новых уравнений можно подойти и к общей оценке ресурсов почвенной влаги — важной компоненты плодородия почвы.

Водный баланс нашей страны изучался указанным методом в Институте географии Академии наук СССР, в Государственном гидрологическом институте, в институтах географии академий наук Азербайджанской и Грузинской ССР. Этот метод получил применение в исследованиях румынских, болгарских и югославских специалистов.

С помощью системы дифференцированных уравнений в Институте географии Академии наук СССР составлено около 60 карт элементов водного баланса материков земного шара и всей суши в целом. По методическим подходам, охвату территории и масштабу использованных данных эта работа отличается от всего, что было сделано ранее в этом направлении.

Одна из трудностей заключалась в том, что значительные территории суши в гидрологическом отношении либо не изучены, либо изучены очень слабо. Для восполнения этого пробела использовались специальные интерполяционные зависимости, основанные на структурных кривых водного баланса, которые отображают зависимость подземного стока U и испарения E от валового увлажнения территории W . Переменная W заменялась P — осадками, которые более полно изучены, чем речной сток. Зависимости U , $E = f(W)$ и $U, E = f(P)$ устанавливались для отдельных географических зон, что позволяло учесть ряд других факторов, которые существенно влияют на водный баланс, — почву, растительность, климат и т. д. Принцип структурных кривых был предложен нами (1962) для изучения зональных закономерностей водного баланса СССР. Теперь подобные кривые составлены для всех материков, причём впервые удалось установить закономерности структуры водного баланса для зон тропического пояса — различных типов саванн, вечно влажных шлейных лесов и т. п.

Интерполяционные зависимости дают, конечно, приближенные результаты: среднеквадратичные погрешности полученных 16 кривых колеблются в пределах от 2 до 18%. Преобладают погрешности около 10%, что в общем вполне приемлемо для практических выводов, относящихся к наименее изученным странам. Точность для материков в целом и для хорошо изученных территорий СССР, США, европейских стран гораздо выше.

В целях восполнения недостающих данных по горным районам использовался другой способ: устанавливались порайонные зависимости элементов водного баланса от высоты над уровнем моря.

Приближенное картографирование элементов водного баланса имеет важное значение для развивающихся стран, как правило, наименее изученных в гидрологическом отношении. По этой причине нельзя признать правомерной точку зрения некоторых гидрологов, считающих главным условием успеха исследований водного баланса наличие сети наблюдательных станций. (Существует даже мнение о целесообразности отсрочки расчетов мировых водных ресурсов и мирового водного баланса на десятилетия, которые нужно посвятить организации сети гидрологических станций и проведению соответствующих наблюдений.) Развитие такой сети, конечно, необходимо, но это не должно задерживать приближенных решений, без которых не может полноценно развиваться водное хозяйство, а иногда даже народное хозяйство страны в целом.

Изучение водного баланса материков и отдельных стран требовало также данных об атмосферных осадках. В качестве основы послужили карты осадков земного шара, составленные О. А. Дроздовым и дополненные нами национальными картами некоторых стран.

Для каждого континента и для всего земного шара было составлено по

шесть карт следующих элементов: полного речного стока, подземного-стока, поверхностного (паводочного) стока, увлажнения территории (расхода воды на инфильтрацию), испарения и коэффициентов питания рек подземными водами. Кроме того, составлены карты обеспеченности водными ресурсами на душу населения. До завершения этой работы, помимо упомянутых карт атмосферных осадков для всех континентов, существовали карты испарения (М. И. Будыко) и полного речного стока (М. И. Львович). Теперь мы располагаем еще и картами подземного стока в реки, дающими сведения о наиболее ценном источнике водных ресурсов,— он устойчив и, как правило, предохранен от загрязнений. Поверхностный (паводочный) сток чаще всего характеризует потенциальные водные запасы, поскольку они приобретают хозяйственную ценность после регулирования водохранилищами или мелиоративными средствами. Однако в некоторых случаях и паводочные воды расходуются без предварительного регулирования, например в засушливых районах, примыкающих к горам (Средняя и Центральная Азия, Закавказье, Колорадо и Калифорния, пустыня Атакама и т. п.). Здесь в результате таяния горных ледников и высокогорных снегов как раз в период вегетации формируются продолжительные паводки, которые с успехом используются для орошения. Инфильтрация, или валовое увлажнение территории, в общем виде характеризует ресурсы почвенной влаги. Испарение имеет большое значение как одно из звеньев круговорота воды, не говоря уже о том, что приблизительно половина испарения с суши продуктивное,— это транспирация, являющаяся важным процессом жизнедеятельности растений.

Как свидетельствует сравнительный анализ карт отдельных элементов водного баланса наиболее точно, несмотря на интерполяции, оценивается полный речной сток, что связано с высокой репрезентативностью гидрометрических наблюдений. Затем идут атмосферные осадки. Сеть дождемеров весьма полно охватывает сушу, но результаты наблюдений недостаточно сравнимы из-за различных типов этих приборов в разных странах. Кроме того, данные требуют ряд поправок, например на выдувание из дождемеров осадков, особенно снежных. Следующее место по точности занимают генетические составляющие речного стока — подземного и поверхностного. Наименее точными следует признать вычисления испарения и валового увлажнения территории, так как в этих случаях возможно суммирование ошибок, допущенных при оценке двух элементов — осадков и полного стока или осадков и поверхностного стока.

Приведенные соображения относятся к отдельным районам. Относительно более надежны обобщенные данные по частям суши и по земному шару в целом (табл. 2). Самая высокая точность в определении водного баланса и водных ресурсов отдельных материков достигнута для Европы, затем для Северной Америки (хотя по северу Канады очень мало фактических данных), далее следуют Австралия, зарубежная часть Азии, наконец, Африка и Южная Америка.

В результате выполненных в последние годы оценок наиболее существенно изменились представления о полном речном стоке Южной Америки, в основном за счет Амазонки. По прежним подсчетам средний расход воды этой реки составлял 110 тыс. $m^3/сек$, а годовой объем стока 3500 $км^3$. Сейчас, хотя новые вычисления носят приближенный характер, появились основания оценить средний расход Амазонки в 190 тыс. $m^3/сек$, а объем годового стока в 6000 $км^3$.

Что касается Советского Союза, то его территория относится к наиболее изученным в отношении речного стока. Высокий уровень гидрологической науки, а также множество гидрологических и метеорологических станций позволяют вполне надежно решать любые проблемы в данной области.

Таблица 2

Водный баланс и ресурсы пресных вод континентов, СССР и суши в целом

Элементы	Европа	Азия	Африка	Сев. Америка	Юж. Америка	Австра- лия	Вся суша*	В том чис- ле СССР
Осадки, <i>P</i>	734	726	686	670	1648	736	834	500
полный сток, <i>R</i>	319	293	139	287	583	226	294	198
подземный, <i>U</i>	109	76	48	84	210	54	90	46
поверхностный, <i>S</i>	210	217	91	203	373	172	204	152
Валовое увлажнение территории, <i>W</i>	524	509	595	467	1275	564	630	348
Испарение, <i>E</i>	415	433	547	383	1065	510	540	300
Осадки, <i>P</i>	7165	32690	20780	13910	29355	6405	110305	10960
полный сток, <i>R</i>	3110	13190	4225	5960	10380	1965	38830	4350**
подземный, <i>U</i>	1065	3410	1465	1740	3740	465	11885	1020
поверхностный, <i>S</i>	2045	9780	2760	4220	6640	1500	26945	3330
Валовое увлажнение территории, <i>W</i>	5120	22910	18020	9690	22715	4905	83360	7630
Испарение, <i>E</i>	4055	19500	16555	7950	18975	4440	71475	6610

* Исключая Антарктиду, Гренландию и Канадский архипелаг.

** Не считая 300 км³ транзитного стока, формируемого за пределами СССР.

Подземный сток не в полной мере характеризует устойчивые речные ресурсы. Чтобы представить себе весь их объем, нужно еще учесть зарегулированный сток: естественный — озерами и искусственный — водохранилищами. Первый учтен в основном для таких больших рек, как Нева, Ангара, Нил, Св. Лаврентия и др. Второй приближенно рассчитан по новейшим данным А. Б. Авакяна и С. П. Овчинниковой (1971) об объеме водохранилищ мира.

Благодаря тому, что паводочный сток значительно зарегулирован водохранилищами, естественный устойчивый речной сток мира возрос на 1400 км^3 в год, или на 15%. Это чрезвычайно большое достижение человечества. Нужно сказать, что антропогенные факторы стали играть важную роль в гидрологии и без их учета нельзя вести научные исследования и решать практические задачи. К таким факторам относятся, например, воздействия на водный баланс и речной сток агрономических и лесохозяйственных мероприятий. Роль этих факторов довольно хорошо изучена для СССР, отчасти для Польши, ГДР и ФРГ, но еще слабо исследована в масштабе материков земного шара в целом.

Для полной характеристики ресурсов пресных вод Земли необходимо знать сток Гренландии, Канадского архипелага и Антарктиды. Почти вся поверхность этих частей суши покрыта ледниками. Сток в океан здесь происходит в виде льда, воды, образующейся в результате абляции ледников за короткое лето, и снега, сдуваемого с ледниковых щитов. Сток с Гренландии и Канадского архипелага, на основании данных экспедиции А. Ве-генера (1932), был нами (1945) оценен приблизительно в 700 км^3 , или в 180 мм в год. Новые данные в общем подтверждают этот вывод. Сток Антарктиды, по данным В. М. Котлякова, К. С. Лосева и И. А. Лосевой (1971), — 2200 км^3 , или 150 мм .

Суммарный мировой сток, включая полярные ледники, равен $41\,730 \text{ км}^3$ в год. Из этого объема на замкнутые, «бессточные» области (бассейны Каспийского, Аральского морей и др.) падает около 730 км^3 , остальной сток питает океан, что составляет на его акватории слой в 111 мм (по прежним подсчетам 100 мм).

На основании новых карт сделана также балансовая оценка водных ресурсов почти всех стран, причем приблизительно для половины из них, насколько известно, впервые. Достаточно сказать, что фактические гидрологические данные имеются только для 14 (из 50) африканских стран. Но и для экономически развитых стран Европы и Северной Америки столь полное представление о ресурсах пресных вод, включая и подземный сток, получено также впервые.

Сведения о ресурсах пресной воды еще ничего не говорят об обеспеченности ими людей. Первым шагом для такой оценки могут служить данные о количестве пресной воды (стока), приходящейся на душу населения. Меньше всего воды (ресурсов устойчивого стока) приходится на одного жителя Азии ($1960 \text{ м}^3/\text{год}$) и Европы ($2100 \text{ м}^3/\text{год}$), больше всего — Южной Америки ($21100 \text{ км}^3/\text{год}$). Для земного шара в целом обеспеченность пресной водой на душу населения составляет около $4000 \text{ км}^3/\text{год}$. Однако эти показатели определяются не только естественным распределением водных ресурсов и численностью населения, но в большей степени уровнем развития промышленности и орошаемого земледелия. Хотя в пределах континентов водные ресурсы распределены весьма неравномерно и внутри отдельных стран колебания обеспеченности водой одного человека очень резки, тем не менее оценка по континентам не лишена смысла, особенно если учесть потенциальные возможности переброски воды из районов, где она в избытке, в районы со скудными водными ресурсами.

Территория Советского Союза богата пресной водой. По годовому объе-

му полного речного стока он занимает второе место после Бразилии. Однако по запасам на единицу площади (в мм слоя) дело обстоит далеко не так. Слой полного речного стока в СССР составляет 73 соответствующей величины для всей суши, а слой наиболее ценных ресурсов пресной воды — подземного стока — почти в два раза меньше. По обеспеченности на душу населения ($5800 \text{ км}^3/\text{год}$) у нас показатели значительно выше, чем во многих других странах. Однако в наиболее густонаселенных и экономически развитых районах СССР этот показатель в 3—4 раза ниже. К этому нужно добавить, что большая часть пахотных земель у нас расположена в зонах недостаточного и переменного увлажнения, где урожаи в значительной мере зависят от ресурсов почвенной влаги и от орошения. Вместе с тем потенциальные запасы пресных вод в Советском Союзе весьма велики. К ним прежде всего относится поверхностный (паводочный) сток, который служит источником умножения ресурсов устойчивого стока. Уже сейчас с помощью водохранилищ они увеличены приблизительно на 25—30%. Перспективы в этом отношении еще весьма значительны, особенно учитывая возможность создания подземных водохранилищ, которые в будущем, по-видимому, займут не меньшее место, чем поверхностные, так как не требуют затопления земель и предохраняют воду от загрязнения. Кроме того, поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий представляет собой важный резерв увеличения ресурсов почвенной влаги на неорошаемых полях. Эти ресурсы только на пахотных землях южной половины Европейской части СССР с помощью агрономических средств выросли приблизительно на 15 км^3 в год, что весьма способствовало повышению урожаев в степной и лесостепной зонах. Отметим для сравнения, что такого объема воды достаточно для орошения приблизительно 3 млн га зерновых культур в степной зоне.

Преобразование речного и литогенного (подземные воды, почвенная влага) звеньев круговорота воды возможны в больших масштабах и в других частях земного шара. Частично оно осуществляется, но для оценки его последствий нужны специальные экспериментальные исследования.

Ресурсы пресных вод могут вечно служить человечеству, так как они непрерывно возобновляются в процессе круговорота. Но это замечательное природное свойство необходимо поддерживать и усиливать методами расширенного воспроизводства водных ресурсов, в основном путем умножения устойчивого стока и переброски воды из районов, богатых водой, в засушливые. Но одновременно требуется всемерная экономия воды в промышленности и орошаемом земледелии, а также уменьшение, в будущем и прекращение сброса сточных вод в реки и водоемы. Как показывают исследования Института географии, решение этих взаимосвязанных проблем вполне реально, особенно в условиях планового, строго координируемого хозяйства социалистических стран. Многие меры законодательного и технического характера в этом направлении уже осуществляются в СССР.