

Е.А. Барабанова

ГЛОБАЛЬНО-РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА РЕК ПОД ВЛИЯНИЕМ ВОДОХРАНИЛИЩ (ПО КОСВЕННЫМ ДАННЫМ)

Приводятся данные о воздействии водохранилищ на сток рек. Показаны изменение зависимости полезного объема от полного, изменение устойчивого стока и регулирование паводковой составляющей стока в результате строительства водохранилищ по территории земного шара и отдельным странам для водохранилищ полным объемом 1–10, 10–50, и более 50 км³. Выявлены некоторые региональные особенности регулирования стока водохранилищами и выполнено сравнение особенностей регулирования стока водохранилищами России и других стран.

Оценить воздействие водохранилищ на сток рек можно как непосредственно – по его изменению в замыкающем створе каждой реки, на которой созданы водохранилища, так и косвенно – по величине полезного объема водохранилищ. Непосредственное определение изменений стока в глобальном аспекте чрезвычайно трудоемко и далеко не всегда обеспечено данными гидрологических наблюдений. Косвенные оценки доступней, но дают более приблизительные результаты. Одна из проблем при этом заключается в том, что для расчетов регулирующего действия водохранилищ необходимы сведения по полезному объему водохранилищ, которые по многим странам весьма неполны. Однако недостаток подобной информации может быть восполнен эмпирическим путем. В расчетах также обычно не учитываются малые водохранилища, статистика которых, как правило, отсутствует. Впрочем, их возможный общий объем при доминирующей роли крупных водохранилищ в преобразовании речного стока обычно незначительно влияет на результаты расчетов глобального эффекта крупных водохранилищ. Принимая размер регулирования стока равным сумме полезных объемов водохранилищ, приходится делать допущение, что эти емкости ежегодно однократно заполняются и срабатываются, что далеко не всегда выполняется. Иногда, особенно на небольших водохранилищах, цикл «наполнение – сработка» осуществляется не один раз в году. В других случаях, относящихся в первую очередь к водохранилищам многолетнего регулирования стока, ежегодно срабатывается лишь часть полезного объема.

В ряде работ М.И. Львовича (Львович, 1974, 1986 и др.), с учетом указанных выше допущений, даны расчеты глобального регулирующего действия водохранилищ. М.И. Львович дифференцировал полезный объем водохранилищ в процентах от полного по частям света и получил показатели искусственного регулирования стока. Так, по данным М.И. Львовича (1986), на земном шаре в конце XX столетия эксплуатировалось около 2260 водохранилищ, имеющих объем 100 млн. м³ и более. Их суммарный объем составлял 5132 км³, сток, зарегулированный водохранилищами, – 3195 км³. Сделан вывод, что благодаря этому ресурсы устойчивого стока рек суши (11 885 км³) увеличены приблизительно на 27%, а суммарный устойчивый речной сток вместе со стоком, зарегулированным водохранилищами, составил на конец XX века 15 080 км³/год. Наибольших результатов по увеличению устойчивого стока достигли государства Северной Америки, увеличив его почти на 70%, зарегулировав около 30% поверхностной составляющей речного стока. Почти в 10 раз меньшим количеством водохранилищ Африки устойчивый сток рек этого континента увеличен на 35% при регулировании 19% паводковой составляющей речного стока. В Европе и Азии благодаря регулирующим емкостям водохранилищ ресурсы естественного устойчивого стока увеличены соответственно на 28 и 23%, причем полезный объем водохранилищ Азии более чем в два раза превосходит европейские. В Австралии этот показатель составляет 18%, а в Южной Америке он падает до 9%.

А.Б. Авакяном (1998) на начало XXI века учтено уже 2836 водохранилищ, имеющих объем 100 и более млн. м³, суммарная емкость которых превышает 6380 км³. Выполненные по методике М.И. Львовича расчеты показывают, что ресурсы устойчивого стока рек суши увеличились на 34%, соответственно произошло их увеличение и по частям света в среднем на 7%.

В табл. 1 и 2 приведены данные о регулировании речного стока водохранилищами объемом более 0,1 км³ по континентам земного шара и объемом более 1 км³ по отдельным странам. В таблицах сток, зарегулированный водохранилищами, принят равным их суммарному полезному объему. Современный устойчивый сток найден по сумме показателей естественного устойчивого стока, который соответствует подземному стоку, и полезного объема водохранилищ, или стока, зарегулированного водохранилищами. Увеличение устойчивого стока представляет собой отношение полезного объема к подземному стоку,

Таблица 1. Регулирование речного стока водохранилищами мира (объемом более 0,1 км³)

Часть света	К-во вдхр.	Полный объем вдхр., км³	Сток, зарегулированный вдхр., км³	Естественный устойчивый сток, км³	Современный устойчивый сток, км³	Увеличение устойчивого стока, %	Регулирование паводковой составляющей
по М.И. Львовичу (1986)							
Европа	482	570,3	300	1065	1365	28	15
Азия	554	1463,1	800	3410	4210	23	8
Африка	96	864,9	520	1465	1985	35	19
С.Америка	868	1306,4	1200	1740	2940	69	28
Ю.Америка	187	551,5	330	3740	4070	9	5
Австралия	70	75,7	45	246	291	18	8
Вся суша	2257	5131,9	3195	11666	14861	27	12
по А.Б. Авакяну (1998)							
Европа	576	645	342	1065	1407	32	17
Азия	815	1980	1089	3410	4499	32	11
Африка	176	1001	600	1465	2065	41	22
С.Америка	915	1692	1269	1524	2793	83	33
Центральная и Ю.Америка	265	972	583	3956	4539	15	8
Австралия	89	95	57	246	303	23	11
Вся суша	2836	6385	3958	11666	15624	34	15

Глобально-региональные особенности регулирования стока рек под влиянием водохранилищ (по косвенным данным)

Таблица 2. Регулирование речного стока водохранилищами некоторых стран (объемом более 1 км³) (Авакян, Шарапов 1977; Авакян и др., 1987; Водохранилища мира, 1979; Каталог водохранилищ СССР, 1988; Справочные данные., 1984, 1985, 1986, 1987; Mermel, 1990)

Страна	К-во вдхр.	Полный объем вдхр., км ³	Сток, зарегулированный вдхр., км ³	Естественный устойчивый сток, км ³	Современный устойчивый сток, км ³	Увеличение устойчивого стока, %	Регулирование паводковой составляющей
Россия	40	768	309	885	1194	34,9	10,0
Бразилия	42	525	197	1874	2071	10,5	5,2
Канада	51	764	476	725	1201	65,7	23,6
США	107	439	304	482	786	63,1	24,3
Индия	38	198	129	376	505	34,3	10,7
Китай	69	487	260	960	1220	27,1	13,6

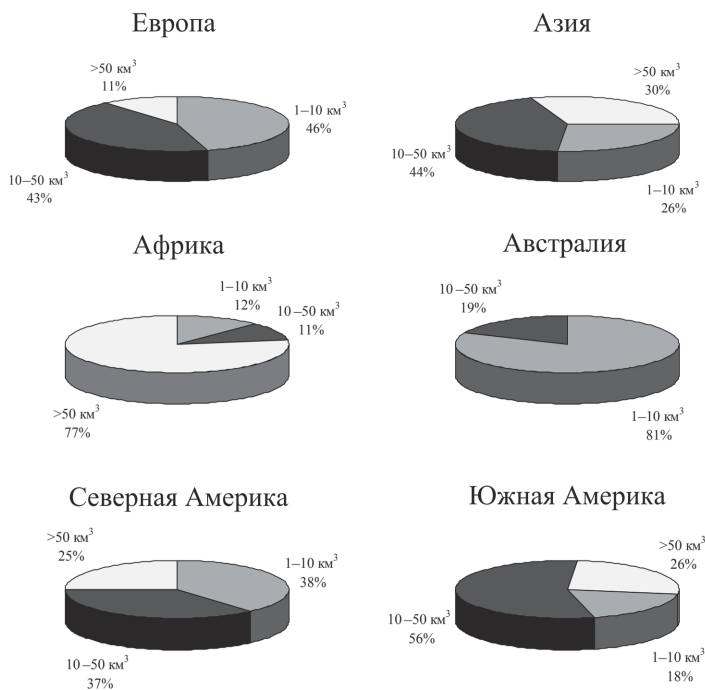


Рис. 1. Региональные особенности распределения водных ресурсов по категориям водохранилищ

выраженное в процентах, а регулирование паводковой составляющей равно отношению полезного объема к поверхностному стоку.

Дифференциация водохранилищ не только по континентам, но и по полному объему водохранилищ (1–10, 10–50 и более 50 км³) позволяет выявить некоторые региональные особенности регулирования стока. В данной работе использованы статистические данные для 641 водохранилища объемом более 1 км³ (Авакян, Шарапов 1977; Авакян и др., 1987; Водохранилища мира, 1979; Каталог водохранилищ СССР, 1988; Справочные данные..., 1984, 1985, 1986, 1987; Mergel, 1990). Их общий объем превышает объем водохранилищ, учтенных М.И. Львовичем, и лишь на 9,6% меньше общего объема водохранилищ, учтенных А.Б. Авакяном.

Анализ распределения водных ресурсов по категориям водохранилищ мира показал, что на африканском континенте почти 80% полного объема водохранилищ сосредоточено в крупнейших (>50 км³) искусственных водоемах, в Австралии такие водохранилища отсутствуют

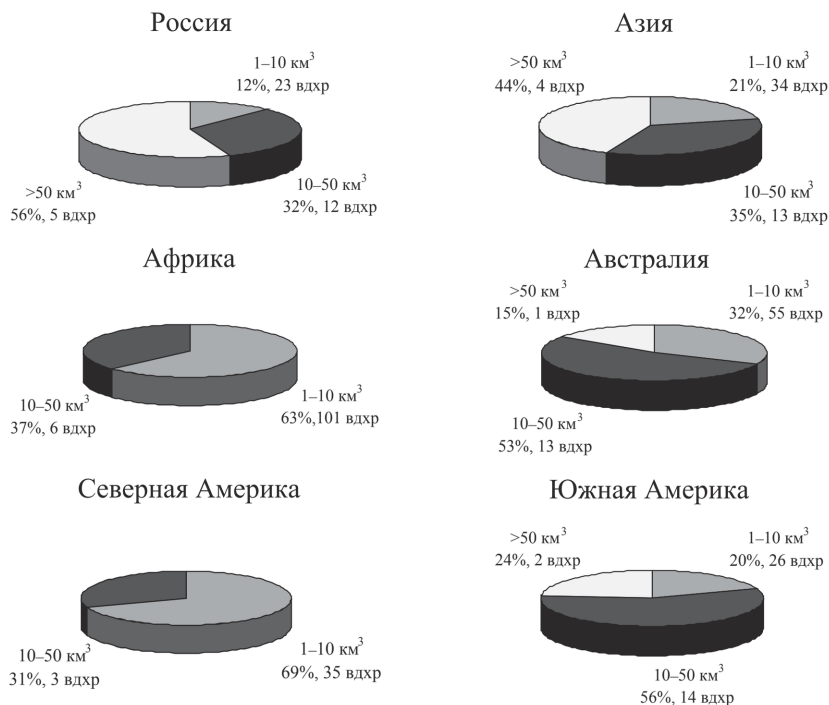


Рис. 2. Особенности распределения водных ресурсов по категориям водохранилищ в отдельных странах

и практически такая же доля объема заключена в крупных (1–10 км³) водохранилищах. В Азии и Южной Америке небольшой перевес над остальными по суммарному объему имеют очень крупные (10–50 км³) водохранилища, соответственно 44 и 56% объема, а в Европе и Северной Америке – крупные (46 и 38%) (рис. 1). В крупнейших водохранилищах России сосредоточено более 50% объема искусственных водных ресурсов. Сходная ситуация наблюдается в Канаде, где также значительный объем водных ресурсов сосредоточен в крупнейших водохранилищах. В США и Индии искусственные водные ресурсы концентрируются преимущественно в крупных водохранилищах, а в КНР и Бразилии – в очень крупных (рис. 2).

Важной составляющей расчетов глобально регулирующего действия водохранилищ является определение их полезного объема. Как известно, полезный объем – это часть емкости искусственного водоема, предназначенная для накопления воды с целью ее хо-

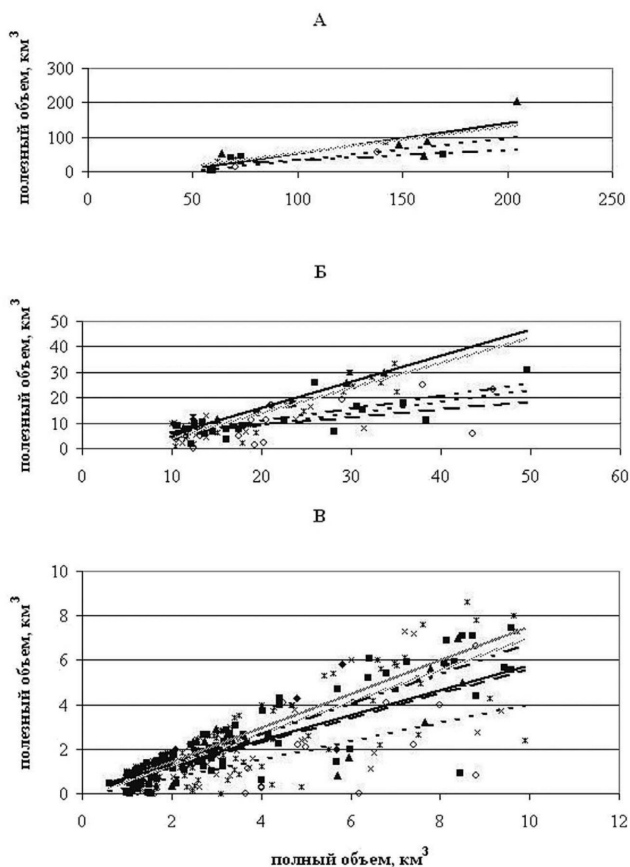


Рис. 3. Соотношение полного и полезного объема водохранилищ емкостью 50 (А), 10–50 (Б) и 1–10 км³ (В)

Водохранилища: Австралии ♦ ————; Африки ▲ ————; Азии ■ - - - -;
Европы × ————; Сев.Америки *; Ю.Америки ◊ - - - -

зяйственного использования и регулирования стока реки. Как правило, зависимость полезного объема от полного носит линейный характер (рис. 3), а показатель этой зависимости называется коэффициентом водохозяйственного использования емкости водохранилища (K_i) (Вода России, 2001).

На рис. 4 показано изменение K_i по территории земного шара и отдельным странам для водохранилищ полным объемом 1–10, 10–50, и более 50 км³. Коэффициент водохозяйственного использования емкости этих водохранилищ колеблется в пределах 0,001–1, в среднем

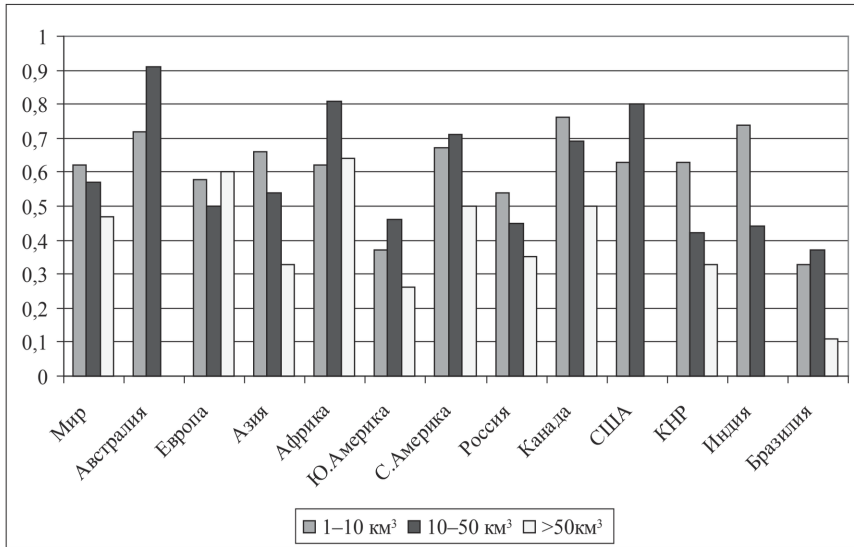


Рис. 4. Изменение Ки по континентам и отдельным странам

составляя 0,55 и изменяясь от 0,36 в Южной Америке до 0,82 в Австралии. Средний Ки России составляет 0,40, почти такой же в Бразилии (0,37). Достаточно высокий Ки в США (0,69), Индии (0,65) и Канаде (0,62). В КНР этот показатель равен 0,53.

У водохранилищ с малым коэффициентом водохозяйственного использования наиболее велика доля стационарных водных ресурсов, или «мертвый» объем. За исключением Южной Америки, где таких водохранилищ 12%, на остальных континентах большую долю «мертвого» объема имеют 3–4% водохранилищ ($K_i < 0,1$). Приблизительно треть водохранилищ Северной Америки и Австралии характеризуются высоким коэффициентом водохозяйственного использования емкости ($K_i > 0,8$). В Азии, Африке и Европе таких водохранилищ от 15 до 20%, а в Южной Америке – всего 4%. В России 12,5% водохранилищ имеют высокий Ки, в Канаде таких водохранилищ более 40%, в США около 30%, в Китае водохранилищ с высоким Ки нет, зато в Индии значения Ки более 0,8 у половины существующих водохранилищ. В Бразилии одно водохранилище имеет показатель Ки более 0,8 и 17% водохранилищ характеризуются его низким значением.

Ниже рассмотрены особенности изменения стока рек под влиянием крупных водохранилищ по континентам и отдельным регионам.

Европа. Больше всего водохранилищ сооружено в Восточной Европе. Их суммарный объем значительно превосходит объем водохранилищ в других регионах Европы. Здесь, в Волжско-Камском и Днепровском каскадах, сосредоточено более 40% техногенных водных ресурсов¹ Европы. Значительное увеличение устойчивого стока (более 75%) произошло в Нидерландах, Португалии и Украине. В большинстве же стран Европы увеличение стока не превысило 25% (рис. 5).

Коэффициент водохозяйственного использования емкости водохранилищ Европы колеблется в пределах 0,07–1. Наиболее многочисленную группу (64%) составляют водохранилища с полезным объемом от 25 до 75% полного. Они представлены во всех регионах Европы, но преобладают в Восточной и Северной Европе. Всего 10% водохранилищ имеют Ки менее 25%. Это водохранилища Норвегии, Европейской территории России и Украины. Водоемы многолетнего и глубокого сезонного регулирования стока, показатель Ки которых более 0,75, составляют 26% от общего числа водохранилищ. Это в первую очередь все озера-водохранилища, и горные водохранилища Южной Европы (Испания, Греция, Португалия).

В Нидерландах и Европейской части России паводок зарегулирован более чем на 75%. В остальных странах этот показатель менее 25%, за исключением Финляндии и Португалии, где паводок зарегулирован соответственно на 26 и 35%.

Азия располагает огромным фондом водохранилищ, которые распределены по ее территории достаточно неравномерно. В Северной и Восточной Азии сосредоточен примерно равный объем техногенных водных ресурсов, при этом в Северной Азии это достигается значительно меньшим количеством водохранилищ, главным образом водохранилищами Ангаро-Енисейского каскада. Значительное увеличение устойчивого стока (более 75%) произошло в странах Средней и Юго-Западной Азии. В Восточной и Южной Азии – преимущественно среднее увеличение устойчивого стока, а в Юго-Восточной – низкое.

В большинстве стран Азии отношение полезного объема водохранилищ к поверхностному стоку составляет менее 25% (рис. 5). Высокие показатели характерны для стран, где произо-

¹ Водные ресурсы, накапливаемые в гидрографической сети в результате гидротехнического строительства и преобразования природных элементов – речных долин, озерных котловин, морских заливов (Вода России, 2001).

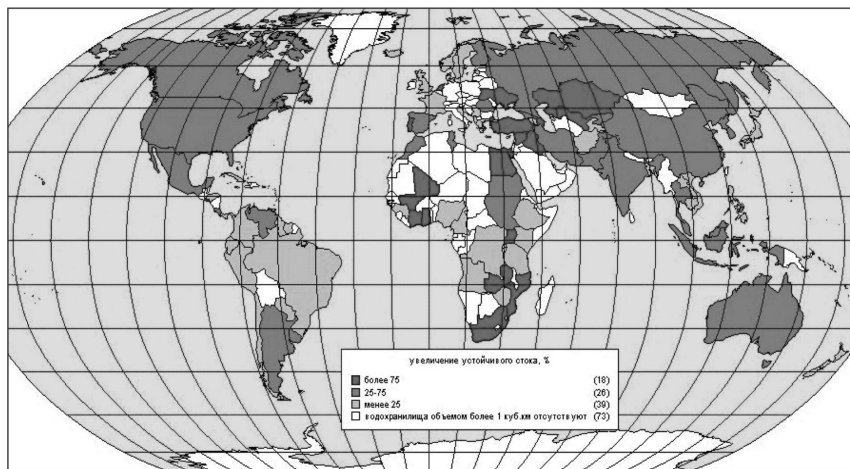


Рис. 5. Увеличение устойчивого стока водохранилищами объемом более 1 км³ по странам мира

шло значительное увеличение ресурсов устойчивого стока, а именно в Средней (Узбекистан, Казахстан) и Юго-Западной (Азербайджан, Ирак) Азии.

Коэффициент водохозяйственного использования емкости водохранилищ Азии колеблется от 0,01 до 1. Так же как и в Европе, наиболее многочисленна группа водохранилищ (76%), полезный объем которых составляет 25–75% полного. Они представлены во всех регионах Азии, но преобладают в Восточной Азии. Практически одинаковое количество водохранилищ во всех регионах с малым Ки. А в Южной Азии довольно значительное по сравнению с другими регионами количество водохранилищ с высоким Ки.

Африка. Незначительное увеличение ресурсов устойчивого стока (менее 25%) произошло в странах, где подземный сток относительно высокий, это Нигерия, Гвинея, Заир, Камерун, Ангола, либо в странах, где число водохранилищ и их объем незначительны (Эфиопия, Кения, Танзания, Зимбабве). Значительное увеличение (более 75%) ресурсов устойчивого стока, в ряде случаев в сотни раз, произошло в странах, где сооружены водохранилища-гиганты (Насер, Виктория, Вольта) и очень крупные водохранилища, т.е. там, где суммарный полезный объем водохранилищ достаточно велик (рис. 5).

Коэффициент водохозяйственного использования емкости водохранилищ Африки колеблется в пределах 0,02–0,97. Наиболее многочисленную группу (61%) составляют водохранилища с полезным объемом от 25 до 75% полного. Главным образом они расположены в странах Южной (Замбия, Зимбабве, ЮАР), Северной (Египет, Тунис, Марокко) и Западной Африки (Мали, Гвинея). Менее многочисленную группу (31%) образуют водоемы многолетнего и глубокого сезонного регулирования стока, показатель Ки которых более 0,75. По африканскому континенту они распределены довольно равномерно, но в странах Западной (Мали, Нигерия, Кот-д'Ивуар) и Центральной Африки (Камерун, Заир) их несколько больше. Максимальное значение коэффициента (0,97) в водохранилище Росейрес, расположенном на р. Голубой Нил в Судане. Совсем немногочисленна (8%) группа водохранилищ с Ки менее 0,25, куда входит всего 4 водоема: два в Южной Африке – Гордж на р. Кафуэ в Замбии (0,15) и Оливейра Салазар на р. Ревуэ в Мозамбике (0,19), и по одному в Центральной – Куинмаха на р. Бенго в Анголе (Ки – 0,02), и Восточной Африке – Оуэн-Фолс (0,074) в Уганде.

В подавляющем большинстве стран Африки регулирование паводка водохранилищами осуществляется менее чем на 25%. Однако в ЮАР, Кот-д'Ивуаре и Марокко паводковая составляющая зарегулирована на 25–75%, а в странах, где сооружены водохранилища-гиганты (Египет, Уганда, Гана, Мозамбик) – более чем на 75%.

Северная Америка. В США и Канаде в результате строительства водохранилищ современный устойчивый сток увеличен более чем на 60%. Значительное увеличение устойчивого стока произошло в Мексике (43%), Коста-Рике (36%) и Сальвадоре (33%). В остальных странах Средней Америки увеличение устойчивого стока составляет примерно 11% (рис. 5).

Коэффициент водохозяйственного использования емкости водохранилищ Северной Америки колеблется в пределах 0,002–1. Более трети водохранилищ осуществляют глубокое сезонное регулирование стока, т.е. их полезный объем более 75% полного. Почти у половины всех водохранилищ показатель Ки изменяется в пределах 0,25–0,74. Эта группа водохранилищ преобладает во всех регионах Северной Америки.

Водохранилищами Мексики регулируется более 30% паводка. До 24% паводка зарегулировано водохранилищами США и Канады. В остальных странах Центральной Америки этот показатель не превышает 15%.

Южная Америка. Значительное увеличение устойчивого стока в результате строительства водохранилищ отмечается в Аргентине (64%), Уругвае (33%) и Венесуэле (26%). В Бразилии устойчивый сток увеличился на 10,5%, а в остальных странах этот показатель менее 8% (рис. 5).

Коэффициент водохозяйственного использования емкости водохранилищ Южной Америки изменяется от 0,001 до 0,9. Довольно много водохранилищ с небольшой долей полезного объема в полном. Все они, как и водохранилища глубокого сезонного регулирования стока, расположены в странах бассейна Амазонки и Лаплатской низменности. Водохранилища Андских стран полностью входят в категорию среднего показателя Ки.

Существенное регулирование паводковой составляющей стока осуществляется в Аргентине (51%). В Уругвае и Венесуэле этот показатель соответственно 21 и 11%. В остальных странах отношение полезного объема к поверхностному стоку значительно меньше.

Австралия. В Австралии в конце XX века полный объем водохранилищ емкостью более 1 км³ составил 63 км³. Ими зарегулирован сток в объеме 47 км³. При этом произошло увеличение устойчивого стока на 19%, а паводок зарегулирован на 9% (рис. 5).

Регулирование стока осуществляется исключительно крупными водохранилищами (1–10 км³). Единственное водохранилище, принадлежащее к разряду очень крупных, расположено на о. Тасмания. Это горное водохранилище Гордон, высота плотины которого 130 м, объем при НПУ 11,8 км³, площадь зеркала 270 км².

Ки водохранилищ Австралии изменяется от 0,31 до 1, и в среднем составляет самый высокий показатель по миру. Более 70% водохранилищ имеют полезный объем от 25 до 75% полного, т.е. осуществляют сезонное и многолетнее регулирование стока.

В заключение рассмотрим особенности регулирования стока водохранилищами России.

В **России** построено и находится в эксплуатации свыше 2000 водохранилищ различного назначения объемом более 1 млн. м³. Их общие суммарные показатели следующие (включая подпертые озера): площадь водного зеркала – 107682,0 км², полный объем – 849230,0 млн. м³, полезный объем – 382142,0 млн. м³. Из общего количества водохранилищ 105 имеют объемы свыше 100 млн. м³. Суммарный объем 40 водохранилищ емкостью более 1 км³ составляет почти 90% общего объема воды, аккумулированного водохранилищами России (Водохранилища мира, 1979).

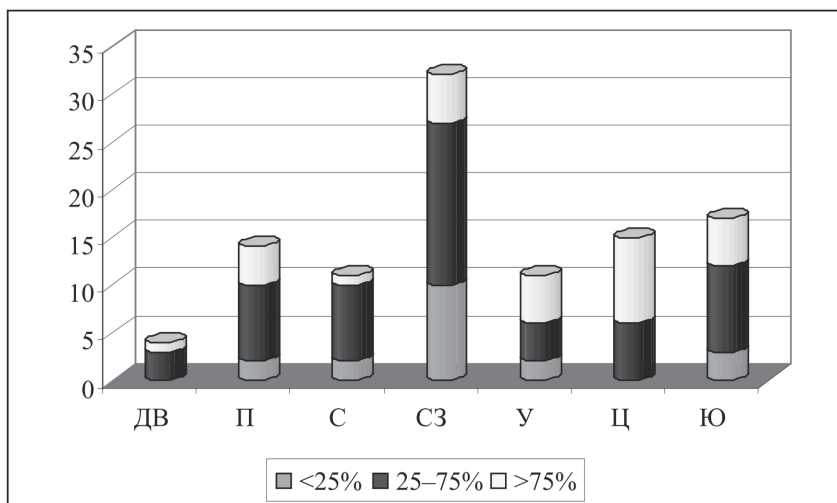


Рис. 6. Распределение водохранилищ по территории федеральных округов России в зависимости от величины Ки. Федеральные округа:

ДВ – Дальневосточный, П – Приволжский, С – Сибирский, СЗ – Северо-Западный, У – Уральский, Ц – Центральный, Ю – Южный

Большая часть водохранилищ расположена в Европейской части России в бассейнах р. Волги и Камы, в Карелии. В Сибири наибольшие регулирующие емкости сосредоточены на Ангаро-Енисейском каскаде ГЭС. Каскады ГЭС в Сибири выгодно в экономическом и экологическом отношении отличаются от европейских вследствие больших напоров и мощностей при меньших удельных показателях площадей затоплений и резком сокращении мелководий. Здесь сосредоточена почти половина всех искусственных водных ресурсов России за счет таких крупнейших водохранилищ, как Братское, Красноярское, Саяно-Шушенское.

В целом по России в результате строительства водохранилищ произошло увеличение устойчивого стока на 36%, причем значительное его увеличение наблюдается в Поволжье и на Северном Кавказе. Водохранилищами России регулируется более 10% паводка.

Коэффициент водохозяйственного использования емкости водохранилищ России объемом более 0,1 км³ изменяется от 0,01 (Серебрянское-2 на р. Воронья) до 0,98 (Рузское на р. Рузе). Почти треть водохранилищ имеют полезный объем более 75% полного. Это преимущественно водохранилища, расположенные в Центральном феде-

ральном округе. Более чем у половины водохранилищ этот показатель изменяется в диапазоне 0,25–0,75. Такие водохранилища расположены главным образом в Северо-Западном федеральном округе (рис. 6).

Сравнение особенностей регулирования стока водохранилищами России и других стран (табл. 2) показало, что по характеру распределения водных ресурсов по категориям водохранилищ прослеживается сходство между Россией и Канадой, тогда как по увеличению устойчивого стока и регулированию паводковой составляющей Россия более всего близка Индии.

Литература

1. *Авакян А.Б.* Водохранилища – новые географические объекты XX века // Гидрология и русловые процессы. Труды Академии водохозяйственных наук. Вып. 5. 1998. С. 6–15.
2. *Авакян А.Б., Шарапов В.А.* Водохранилища гидроэлектростанций СССР. М.: Энергия, 1977. 399 с.
3. *Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А.* Водохранилища. М.: «Мысль», 1987. 325 с.
4. ВОДА РОССИИ: Водохранилища. Екатеринбург: Изд-во «АКВА-ПРЕСС», 2001. 700 с.
5. Водохранилища мира. М.: Наука, 1979. 287 с.
6. Каталог водохранилищ СССР. М.: 1988. 276 с.
7. *Львович М.И.* Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 447 с.
8. *Львович М.И.* Вода и жизнь: (Водные ресурсы, их преобразование и охрана). М.: Мысль, 1986. 254 с.
9. Справочные данные по гидроэлектростанциям мира // Гидроэлектростанции стран Северной, Центральной и Южной Америки. М.: Гидропроект, 1984. 278 с.
10. Справочные данные по гидроэлектростанциям мира. Гидроэлектростанции стран Азии. М.: Гидропроект, 1985. 218 с.
11. Справочные данные по гидроэлектростанциям мира. Гидроэлектростанции стран Африки, Филиппин, Индонезии, Австралии, Новой Зеландии и Океании. М.: Гидропроект, 1986а. 341 с.
12. Справочные данные по гидроэлектростанциям мира. Гидроэлектростанции стран Европы. Часть 1. М.: Гидропроект, 1986б. 306 с.

13. Справочные данные по гидроэлектростанциям мира // Гидроэлектростанции стран Европы. М.: Гидропроект, 1987. 401 с.
14. *Mermel T. W.* The World's Major Dams and Hydro Plants // The International Water Power and Dam Construction. 1990. №5. P. 50–60.

E.A. Barabanova

**GLOBAL-REGIONAL SPECIAL FEATURES OF THE FLOW
REGULATION UNDER THE RESERVOIRS IMPACT
(BY INDIRECT DATA)**

The data on the reservoirs impact on the river flow is cited. Changes in the dependence between total and effective capacity, changes in stable runoff and regulation of flood component of the flow in the result of reservoirs building are shown. Some regional special features of the flow regulation are revealed for the reservoirs by total volume 1-10, 10-50, and more than 50 km³. Comparison of the special features of flow regulation by reservoirs of Russia and other countries is executed.