

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.551

### ВОДОХРАНИЛИЩА МИРА: АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА РЕГУЛИРУЕМЫХ РЕК<sup>1</sup>

© 2020 г. С. Г. Добровольский<sup>а</sup> \*, И. П. Лебедева<sup>а</sup>, М. Н. Истомина<sup>а</sup>, И. В. Соломонова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 3, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: sgdo@bk.ru

Поступила в редакцию 11.03.2019 г.

После доработки 09.06.2019 г.

Принята к публикации 07.07.2019 г.

Обобщена информация по 388 водохранилищам мира и изменениям годового, максимального и минимального стока регулируемых ими рек в таком же количестве створов по 102 позициям для каждого ряда. Показано, что наличие водохранилищ приводит в среднем к увеличению коэффициентов вариации и асимметрии многолетних колебаний речного стока, а также к увеличению коррелированности годового (это не относится к годовому стоку рек, регулируемых водохранилищами ГЭС), максимального и минимального стока смежных лет, порядков авторегрессионных моделей стока, доли нестационарных по математическому ожиданию рядов стока. Проанализировано влияние регулирующей способности водохранилищ (“степени регулирования”) на характеристики многолетних колебаний стока. Изучена более тонкая структура многолетних колебаний стока зарегулированных рек: выявлен эффект “перемежающейся нестационарности” – чередование в одном и том же ряде стока зарегулированной реки сегментов, соответствующих фрагментам реализаций случайных процессов со статистически значимыми положительными и отрицательными “трендами” и с отсутствием трендов. Высказана гипотеза о самопроизвольном усилении в результате строительства водохранилищ явления “перемежающейся нестационарности” в изменениях водности рек.

*Ключевые слова:* статистический анализ параметров водохранилищ, изменения стока регулируемых рек, перемежающаяся нестационарность.

**DOI:** 10.31857/S0321059620010162

#### ВВЕДЕНИЕ

Вследствие почти повсеместного увеличения антропогенной нагрузки на водные ресурсы суши, а также вследствие роста неопределенностей, связанных с изменениями климата, продолжает быть актуальным (и даже становится более неотложным) исследование особенностей многолетних изменений речного стока, регулируемого водохранилищами, и связей параметров стока с параметрами водохранилищ.

Ранее работы по изучению изменений в системе “водохранилище—река” в климатическом масштабе осуществлялись в региональном плане. Однако представляется целесообразным провести такого рода исследование и в глобальном масштабе. Вовлечение в анализ возможно большего объема информации по параметрам водохранилищ и по параметрам изменений речного стока

может выявить закономерности, которые на региональном уровне малозаметны вследствие влияния многочисленных местных факторов. Также глобальный подход к проблеме может повысить достоверность отдельных закономерностей, которые выявляются в меньших пространственных масштабах. Наконец, глобальное исследование структуры “водохранилище—река” может иметь мировоззренческую цель: сформировать общую, планетарную картину крупных искусственных водоемов суши и их влияния на сток.

Проведенные ранее исследования водохранилищ [1, 4] и изменений речного стока [6, 7] в глобальном масштабе велись отдельно, причем в случае водохранилищ – на описательном уровне. Таким образом, задача настоящего исследования – изучение глобальных закономерностей многолетних изменений стока рек, регулируемых водохранилищами, на основе совместного анализа возможно большего объема информации по водохранилищам и стоку и с использованием современных методов анализа временных рядов.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0003 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090105-5) Государственного задания ИВП РАН и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-00375).

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве информационной основы исследования параметров водохранилищ использованы четыре основных ресурса: “Global Reservoir and Dam Database” (GRanD) [12], “International Commission on Large Dams” [13], “International Water Power and Dam Construction” [14], “Вода России” [2], а также ряд других источников. Принципиальное отличие используемой в настоящем случае базы данных от имеющихся баз по водохранилищам состоит в том, что авторы объединили указанные выше ресурсы с базой данных по многолетним изменениям годового, максимального и минимального стока, созданной в Лаборатории глобальной гидрологии ИВП РАН в предыдущие годы и детально описанной в монографиях [5, 6]. В результате в виде электронных таблиц был создан объединенный массив данных по водохранилищам и стоку зарегулированных ими рек. В настоящий момент в него входит информация по 388 водохранилищам и по соответствующему числу находящихся ниже плотин створов с рядами стока длительностью не менее 20 лет. Массив данных представляет собой иерархизированный набор электронных таблиц в формате фирмы StatSoft, позволяющих непосредственно внутри самих таблиц использовать специализированный алгоритмический язык этой же фирмы.

Наиболее полный вариант электронной таблицы включает в себя 102 параметра “речной” части таблиц – параметры водосборного бассейна, замыкаемого створом, и результаты анализа рядов стока в различных вариантах. Часть таблиц, связанная с водохранилищами, включает в себя для каждого водохранилища 9 буквенных и 12 числовых переменных: (1) год постройки (ведения в эксплуатацию) водохранилища; (2) основное назначение водохранилища – в кодовых числах; (3, 4) географические координаты плотины; (5) высота плотины; (6) длина плотины; (7) площадь водохранилища; (8) средняя глубина водохранилища; (9) емкость (объем) водохранилища; (10) средний расход воды через плотину; (11) степень регулирования стока водохранилищем; (12) площадь водосборного бассейна водохранилища. Таким образом, основная таблица содержала 55484 ячейки, к которым в разных вариантах расчетов добавлены также ячейки, содержащие производные от числовых величин: относительные величины, модули величин, логарифмы и т.д.

В электронных таблицах водохранилища разделены на 8 групп в соответствии с их основным назначением. Распределение числа водохранилищ по типам следующее: водохранилища ГЭС – 40, ирригационного назначения – 25, для контроля наводнений – 15, для водообеспечения промышленности и коммунального хозяйства – 11,

рекреационного назначения – 4, для обеспечения навигации – 3, для обеспечения рыбного хозяйства <1, прочие – 2%.

На рис. 1 и 2 изображены картодиаграммы географического положения и объемов основных (включенных в базу) водохранилищ соответственно ирригационного и гидроэнергетического назначения. Необходимо пояснить, что на указанных рисунках и в таблицах фигурируют только те водохранилища, для которых имеется информация по длинным (продолжительностью не менее 20 лет) рядам стока зарегулированных ими рек.

На картодиаграммах на рис. 1 и 2 обращает на себя внимание прежде всего чрезвычайно неравномерное распределение водохранилищ по пространству, в особенности – водохранилищ ирригационного назначения (рис. 1). Водохранилища сгруппированы в пределах отчетливых ареалов – своего рода “кластеров” по природным особенностям и степени экономического развития территорий. Менее четко выражено пространственное распределение водохранилищ ГЭС, при этом в нем отражен в большей степени экономический фактор.

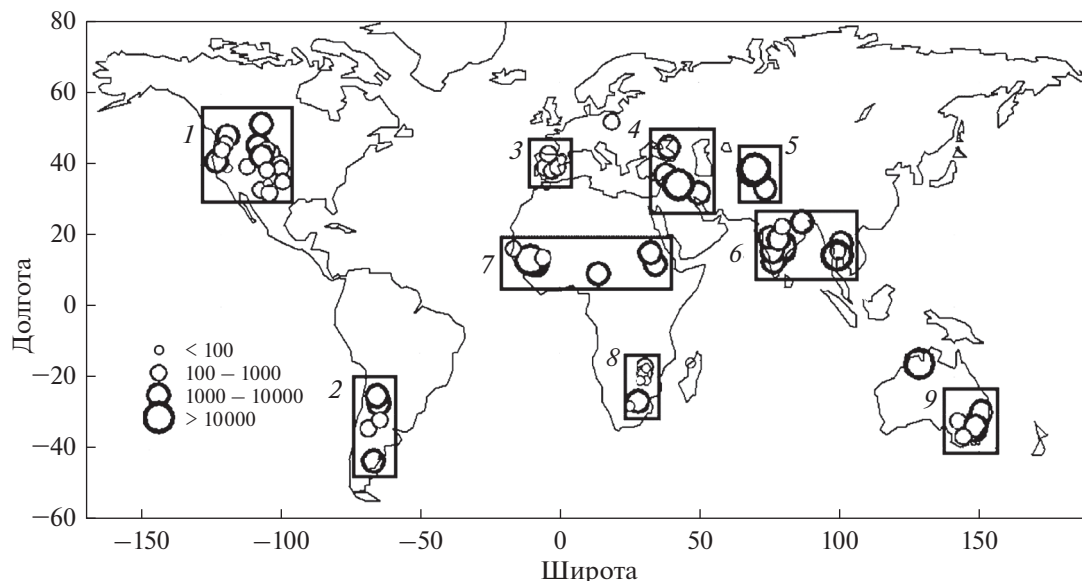
Показателен график изменения параметров вводимых в эксплуатацию водохранилищ на рис. 3а. Если средняя высота плотин на протяжении последних почти 100 лет описывается неубывающей функцией, то средний объем водохранилищ начиная со второй половины 1960-х гг. уменьшался. С 1990-х гг. снижение объемов остановилось, но это произошло из-за ускоренного роста средних высот плотин.

В целом, число вводимых в эксплуатацию водохранилищ достигло максимума в 1960-е гг. и уменьшилось в последующие десятилетия (график на рис. 3б).

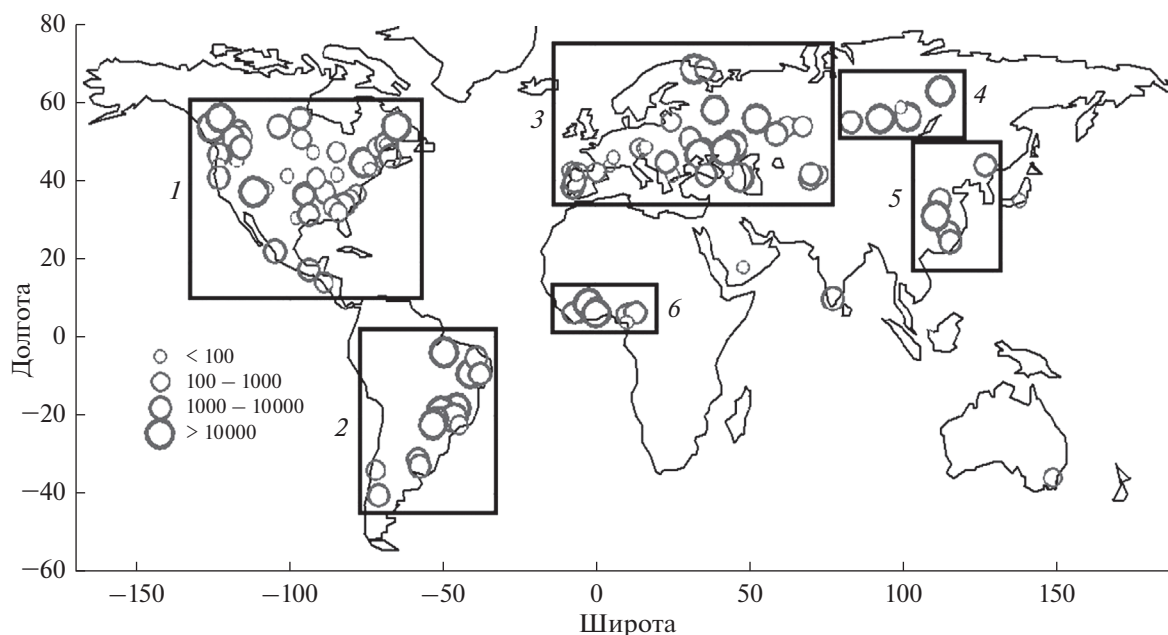
## СТАТИСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ОСНОВНЫХ ТИПОВ

К основным параметрам водохранилищ относятся: площадь водохранилища, средняя глубина, объем водохранилища, средний расход воды через плотину, степень регулирования. Как показывают расчеты, в связи с задачей настоящего исследования наиболее информативен последний из перечисленных параметров, который рассчитывается как частное от деления объема водохранилища на средний ежегодный расход воды через плотину (по существу, это величина, обратная коэффициенту водообмена водохранилища). На рис. 4 и 5 показаны оценки плотности вероятности перечисленных параметров.

Анализ графиков показывает, что плотности вероятности (функции вероятности) всех основных параметров для обоих основных типов водохранилищ удовлетворительно описываются гео-



**Рис. 1.** Картодиаграмма расположения плотин важнейших водохранилищ ирригационного назначения. Основные ареалы расположения водохранилищ: 1 – западный североамериканский, 2 – южный Южной Америки, 3 – иберийский, 4 – кавказско-ближневосточный, 5 – среднеазиатский, 6 – южно-азиатский, 7 – зона Сахели и ее широтное продолжение, 8 – юго-восточный африканский, 9 – юго-восточный австралийский. Кружки разного диаметра – объемы водохранилищ, млн м<sup>3</sup>.



**Рис. 2.** Картодиаграмма расположения плотин водохранилищ важнейших гидроэлектростанций. Основные ареалы расположения водохранилищ: 1 – североамериканский, 2 – южноамериканский, 3 – “евразийский”, 4 – сибирский, 5 – восточноазиатский, 6 – “Гвинейского залива”. Кружки разного диаметра – объемы водохранилищ, млн м<sup>3</sup>.

метрическим распределением – единственным дискретным распределением “с отсутствием памяти” и одним из распределений с максимальной информационной энтропией [8].

Для того чтобы подытожить исследование, связанное с описанием и первичным анализом

созданного в рамках работы массива данных по изучаемым водохранилищам мира, приведем сводную таблицу (табл. 1), суммирующую показатели для общего числа водохранилищ и отдельно для водохранилищ ирригационного и гидроэнергетического назначения.

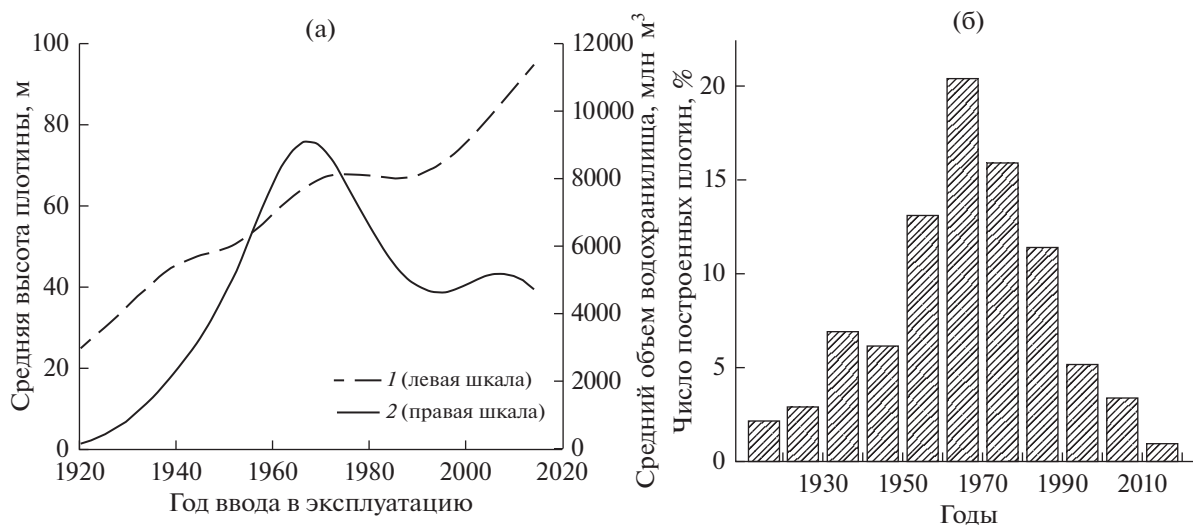


Рис. 3. а – графики изменений во времени средней высоты плотин водохранилищ (кривая 1, левая шкала) и среднего объема водохранилищ (кривая 2, правая шкала); б – изменения числа введенных в эксплуатацию водохранилищ, %.

Очевидно, что по всем фигурирующим в табл. 1 параметрам водохранилища ГЭС в среднем значительно превосходят водохранилища ирригационного назначения: по площади замыкаемого плотиной водосбора в 1.5, по расходам воды через плотину в 4.0, по емкости в 4.3, по площади зеркала в 7.4 раза.

### ВЛИЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ПАРАМЕТРЫ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ СТОКА РЕГУЛИРУЕМЫХ ИМИ РЕК

Остановимся прежде всего на сезонном регулировании стока водохранилищами. Общая роль водохранилищ в сезонном регулировании сопоставлялась с ролью других (естественных) емкостей воды, являющихся источниками рек, путем введения индекса сезонности  $I_S$ , характеризующего относительный размах сезонных колебаний стока:

$$I_S = (Q_{\text{MAX}} - Q_{\text{MIN}}) / Q, \quad (1)$$

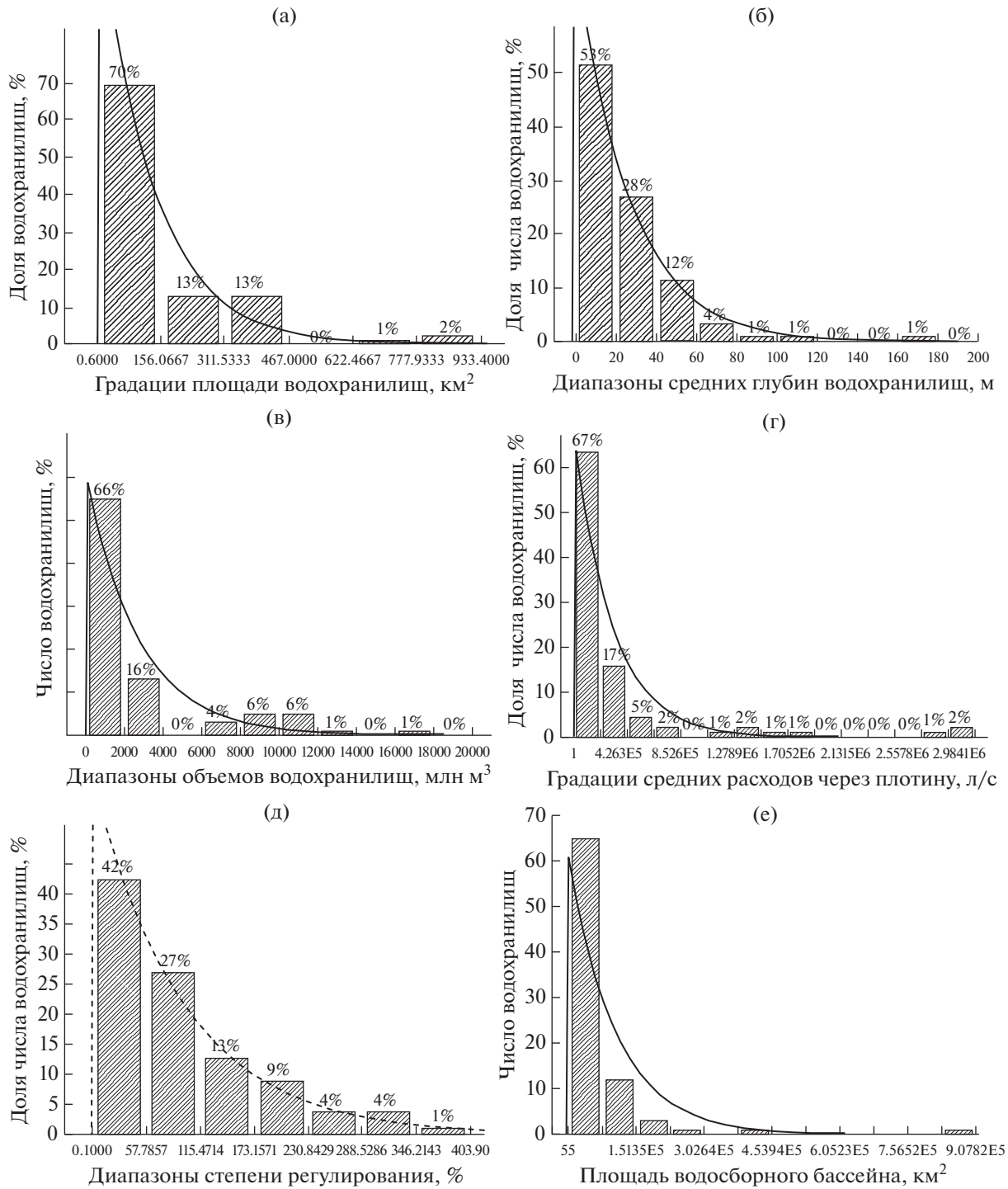
$Q_{\text{MAX}}$  и  $Q_{\text{MIN}}$  – соответственно средний сток наиболее полноводного и наиболее маловодного месяца,  $Q$  – средний многолетний годовой сток

(предполагается, что размерность всех трех величин одинакова, например – м<sup>3</sup>/с). Рассчитанное в [6, 7] по данным о стоке в ~3000 створах рек всех типов питания среднее глобальное значение  $I_S = 3.0$ . В то же время для зарегулированных водохранилищами рек среднее значение  $I_S = 2.2$ . Таким образом, водохранилища уменьшают размах сезонных колебаний стока почти в полтора раза. Характерно то, что подсчитанный авторами индекс сезонности для озерных рек и для рек ледникового питания практически равен значению индекса для регулируемых водохранилищами рек: соответственно 2.2 и 2.1. В этом отношении сезонно-регулирующая роль водохранилищ аналогична роли естественных емкостей воды – озер и горных ледников. В большей степени сезонная изменчивость сглаживается водохранилищами ирригационного назначения: для них в среднем  $I_S = 1.65$ , для водохранилищ ГЭС  $I_S = 2.46$ .

Для анализа особенностей и закономерностей многолетних изменений регулируемого водохранилищами стока использована новая система статистических и стохастических оценок, предложенная одним из авторов [5, 6] и основанная на рекомендациях, вытекающих из фундаментальных работ по теории случайных функций [9, 10,

Таблица 1. Средние значения параметров водохранилищ мира

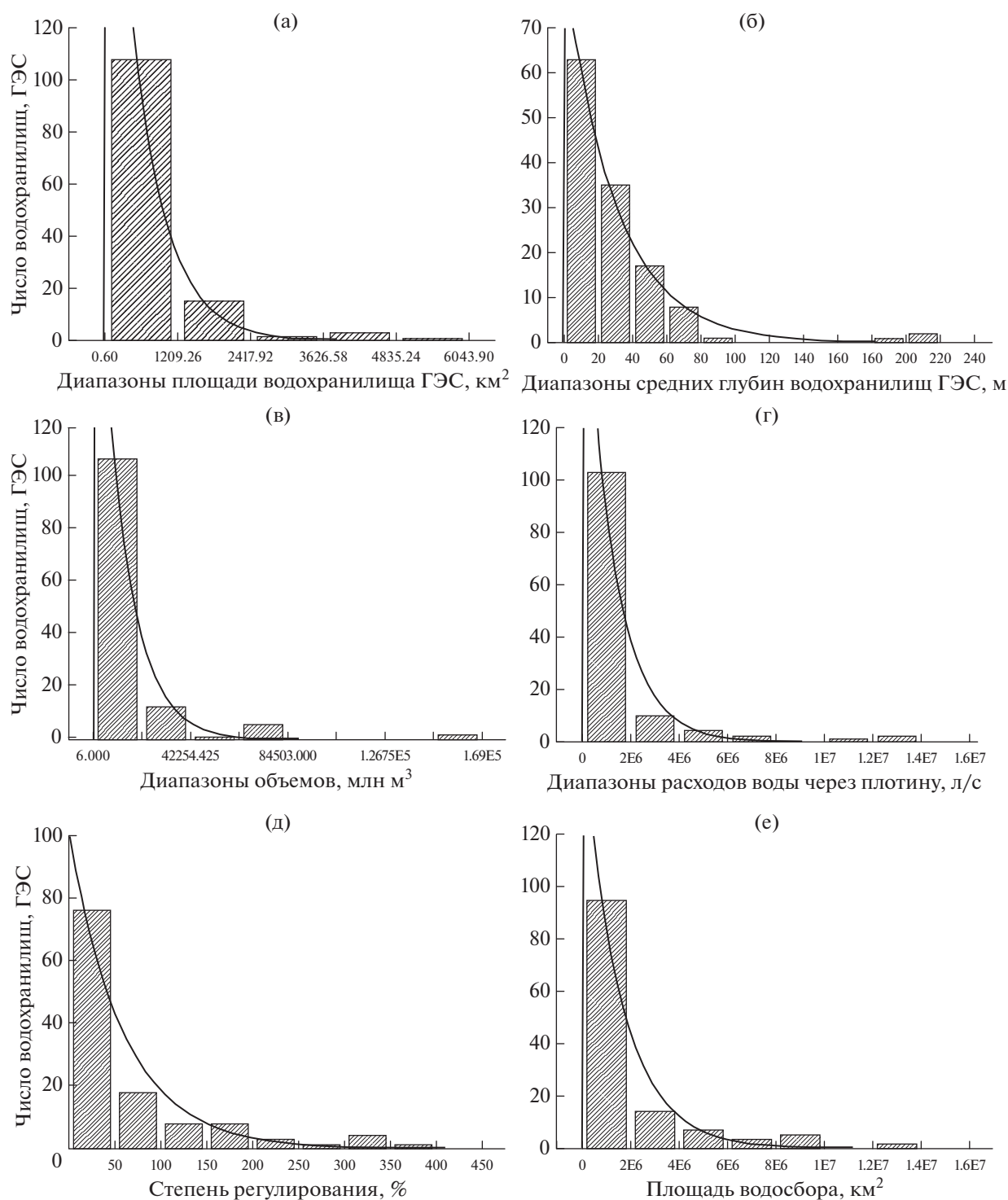
| Назначение | Год ввода в эксплуатацию | Площадь зеркала, км <sup>2</sup> | Глубина, м | Емкость, млн м <sup>3</sup> | Расход, л/с | Площадь водосбора, км <sup>2</sup> |
|------------|--------------------------|----------------------------------|------------|-----------------------------|-------------|------------------------------------|
| Ирригация  | 1960                     | 130                              | 66.1       | 2720                        | 305454      | 103233                             |
| ГЭС        | 1962                     | 963                              | 73         | 11764                       | 1222284     | 154135                             |
| Все        | 1961                     | 323                              | 60         | 5735                        | 638120      | 106307                             |



**Рис. 4.** Гистограммы плотностей вероятности параметров водохранилищ ирригационного назначения: а – площадь водохранилища, б – средняя глубина, в – объем водохранилища, г – средний расход воды через плотину, д – степень регулирования, е – площадь водосборного бассейна.

15–17]. В частности, предложен новый алгоритм генерирования псевдослучайных гауссовских величин (более экономичный, чем описанные в [11]) и новый алгоритм пересчета исходных рядов

в выборочные оценки нормально распределенных величин. При расчете коэффициентов автокорреляции со сдвигом 1 год ( $r_1$ ) к обычной формуле для выборочной оценки  $r_{1, \text{ВЫБ}}$  вводилась по-



**Рис. 5.** Гистограммы плотностей вероятности параметров водохранилищ ГЭС: а – площадь водохранилища, б – средняя глубина, в – объем водохранилища, г – средний расход воды через плотину, д – степень регулирования водохранилищем, е – площадь водосбора, замыкаемого водохранилищем. Кривые на графиках соответствуют геометрическому распределению.

правка, существенно уточняющая широко распространенную формулу Резниковского–Костинной [3].

В работах [5, 6] также введены новые двусторонние критерии  $I_{SM}$ ,  $I_{SS}$ ,  $I_{SR}$  для проверки нулевой гипотезы относительно стационарности ис-

**Таблица 2.** Средние параметры многолетних изменений стока регулируемых водохранилищами рек

| Виды стока   | Параметр | Реки основного типа* | Реки водохранилищ ГЭС** | Реки ирригационных водохранилищ** | Все зарегулированные реки*** |
|--------------|----------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Годовой      | $C_V$    | 0.374                | 0.289                   | 0.590                             | 0.399                        |
|              | $C_S$    | 0.624                | 0.398                   | 1.132                             | 0.665                        |
|              | $r_1$    | 0.147                | 0.228                   | 0.299                             | 0.261                        |
|              | $M$      | 0.534                | 0.698                   | 0.897                             | 0.779                        |
| Максимальный | $C_V$    | 0.468                | 0.407                   | 0.665                             | 0.503                        |
|              | $C_S$    | 0.839                | 0.920                   | 1.280                             | 1.056                        |
|              | $r_1$    | 0.037                | 0.200                   | 0.196                             | 0.199                        |
|              | $M$      | 0.446                | 0.790                   | 0.793                             | 0.791                        |
| Минимальный  | $C_V$    | 0.474                | 0.429                   | 0.949                             | 0.614                        |
|              | $C_S$    | 0.755                | 0.585                   | 1.623                             | 1.025                        |
|              | $r_1$    | 0.296                | 0.395                   | 0.423                             | 0.404                        |
|              | $M$      | 0.851                | 1.171                   | 1.273                             | 1.208                        |

\* Неозерные незарегулированные реки, в питании которых роль горных ледников отсутствует или невелика.

\*\* Реки, регулируемые водохранилищами соответственно ГЭС и ирригационных систем.

\*\*\* Суммарно реки, регулируемые водохранилищами двух типов.

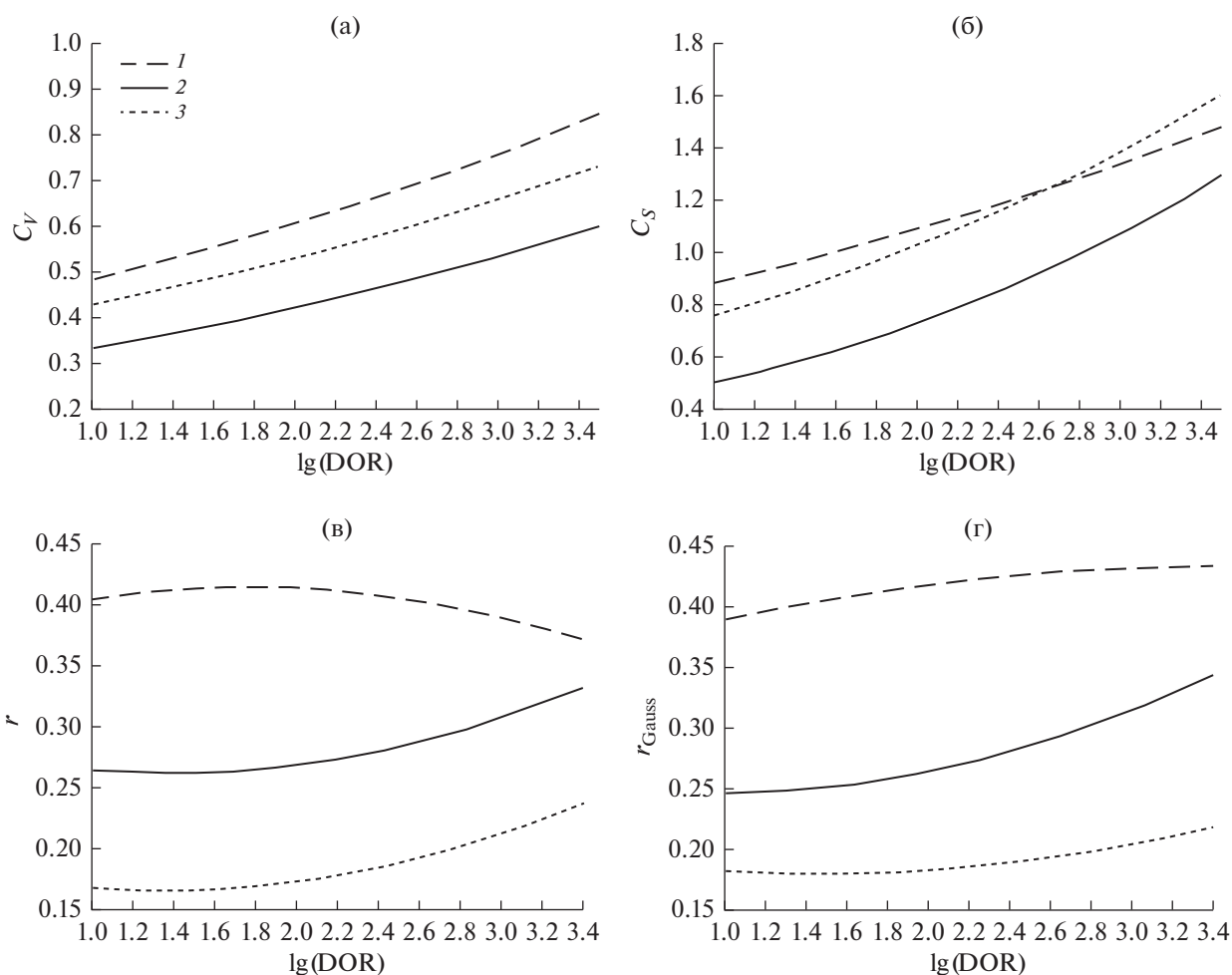
следуемых процессов соответственно по математическому ожиданию, стандартам (дисперсиям), автокоррелированности; для стационарных процессов указанные критерии распределены нормально, с единичным стандартом. Таким образом, если расчеты критериев по реальным рядам дают их значения, существенно превышающие по модулю единичные, это может служить основанием для предположения о нестационарности процессов. Добавим, что для расчетов  $I_{SM}$ ,  $I_{SS}$ ,  $I_{SR}$  сегменты исходных рядов пересчитывались в выборочные значения гауссовских случайных величин.

В табл. 2 помещены результаты расчетов средних значений четырех параметров многолетних колебаний стока рек (зарегулированных водохранилищами двух основных типов, а также суммарно, и для незарегулированных неозерных рек). Как показано выше, размах сезонных изменений стока трансформируется в сторону уменьшения водохранилищами обоих основных типов; таково же воздействие на размах многолетних колебаний годового стока (коэффициент вариации) и водохранилищ ГЭС. В то же время водохранилища ирригационного назначения в среднем существенно (в отношении  $C_V$  – в 1.6 раза) увеличивают многолетнюю изменчивость величин годового стока. Иначе обстоит дело с максимальным и минимальным (месячным) стоком.

Что касается структуры многолетних колебаний стока зарегулированных рек, влияние водо-

хранилищ двух основных типов в отношении рядов как годового, так и максимального и минимального стока однозначно: во всех случаях строительство водохранилищ увеличивает среднюю коррелированность стока смежных лет и увеличивает средний порядок  $M$  стохастических (авторегрессионных) моделей. Следствие этого – увеличение дифференцированности соответствующих графиков спектральной плотности колебаний по частотам.

Представляют интерес оценки характера воздействия конкретных характеристик водохранилищ на рассмотренные выше параметры многолетних колебаний стока зарегулированных рек. Так, графики на рис. 6, построенные совместно для всех типов водохранилищ, иллюстрируют характер влияния наиболее информативного параметра водохранилищ – степени регулирования стока (“degree of regulation” (DOR)), отношения объема водохранилища к годовому объему стока, – на коэффициенты вариации и асимметрии и на коррелированность стока смежных лет для различных видов стока. Для всех видов стока и для всех рассматриваемых параметров ( $C_V$ ,  $C_S$  и величина коррелированности стока смежных лет в двух вариантах) очевиден рост параметров с увеличением DOR – кроме величины коррелированности минимального стока смежных лет, оцененной без пересчета исходных рядов в выборочные значения гауссовских случайных величин.



**Рис. 6.** Зависимости параметров многолетних колебаний стока рек, регулируемых водохранилищами всех типов, от степени регулирования стока водохранилищами, %: а – коэффициент вариации  $C_V$ ; б – коэффициент асимметрии  $C_S$ ; в – коррелированность стока смежных лет  $r$ , рассчитанная по исходным рядам; г – коррелированность стока смежных лет  $r_{\text{Gauss}}$ , оцененная по рядам, пересчитанным в выборочные значения гауссовских случайных величин. 1 – средний годовой сток, 2 – сток наиболее многоводного месяца, 3 – сток наиболее маловодного месяца. Аналитическая аппроксимация поля точек осуществлялась методом полиномов.  $\lg(\text{DOR})$  – логарифм “степени регулирования”.

### О СТАЦИОНАРНОСТИ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ РЕГУЛИРУЕМЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАМИ РЕК. ЯВЛЕНИЕ “ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЙСЯ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ”

Методика оценки степени стационарности рассматриваемых рядов стока описана в работах [5, 6]. Напомним, что  $I_{SM}$  по среднему значению вычислялся следующим образом:

$$I_{SM} = \frac{M_{\text{ВЫБ}}^2 - M_{\text{ВЫБ}}^1}{\sigma(M_{\text{ВЫБ}}^{2, \text{МК}} - M_{\text{ВЫБ}}^{1, \text{МК}})}, \quad (2)$$

$M_{\text{ВЫБ}}^2 - M_{\text{ВЫБ}}^1$  – разность между выборочными средними значениями второй и первой половин ряда стока, вычисляемыми по обычным форму-

лам;  $\sigma(M_{\text{ВЫБ}}^{2, \text{МК}} - M_{\text{ВЫБ}}^{1, \text{МК}})$  – стандарт аналогичной разности, оцененный методом Монте-Карло для стационарной последовательности соответствующей длины и временной коррелированности и аппроксимированный аналитическим выражением.

Кроме того, введем показатели статистик  $I_{SM}$  для групп рядов (створов). Будем считать показателем общей нестационарности рядов (ПНО) величину превышения 5%-го уровня вероятности того, что модуль  $I_{SM}$  выходит за “двойную сигму” (точнее, величину 1.96):

$$\text{ПНО} = P(|I_{SM}| > 1.96) - 0.05. \quad (3)$$

В (3)  $P$  – вероятность, рассчитанная для определенной группы створов (рядов). Иными слова-



**Таблица 3.** Средние показатели стационарности/нестационарности, ПНО для средних значений многолетних изменений стока зарегулированных водохранилищами рек в сопоставлении с реками других типов

| Тип реки         | Годовой сток, % | Максимальный сток, % | Минимальный сток, % |
|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| Зарегулированные | 6.4             | 9.6                  | 24.5                |
| Основной*        | 3.6             | 3.8                  | 17.3                |
| Озерные          | 11.0            | 18.6                 | 22.7                |

\* Неозерные незарегулированные реки.

ми, показателем нестационарности будем считать разность между вероятностью “превышения двойной сигмы” (фактически 1.96 нормированной сигмы) показателем тренда рассматриваемой группы стоковых рядов и соответствующей вероятностью, характерной для группы стационарных последовательностей с аналогичными длинами и автокоррелированностью.

Рассмотрим вначале нестационарность “монотонного” типа – общее повышение или уменьшение математического ожидания величин стока, охватывающее весь ряд наблюдений. Для этого приведем величины ПНО, рассчитанные по всей длине рядов зарегулированных рек, для сопоставления в сравнении с величинами ПНО, рассчитанными для рек неозерных незарегулированных озерных и рек всех типов (данные для незарегулированных рек взяты из архива, описанного в [5]). В табл. 3 помещена соответствующая информация для рек, зарегулированных водохранилищами всех типов.

Данные в табл. 3 показывают, что водохранилища очень существенно (в ~2 раза) увеличивают долю нестационарных изменений годового и максимального стока по сравнению с нестационарными изменениями стока рек основного типа, а также заметно – на 42% увеличивают долю нестационарных изменений минимального стока, доводя его почти до 1/4. Вместе с тем из табл. 3 видно, что наличие озер влияет на увеличение доли нестационарных изменений стока так же (для годового и максимального стока даже в большей степени), как и строительство водохранилищ.

Представляет интерес то, насколько параметры самих водохранилищ (прежде всего основной параметр – степень регулирования стока (DOR)) влияют на степень нестационарности изменений стока “монотонного” типа. На рис. 7 показано, что рост степени регулирования стока водохранилищами очень существенно увеличивает степень нестационарности по средним значениям годового стока, в меньшей степени – максимального стока и практически не влияет на степень нестационарности минимального стока. Другая картина наблюдается в отношении степени нестационарности по стандартам и автокоррелированности: соответствующие индексы  $I_{SS}$  и  $I_{SR}$ , близкие к единичным (“стационарным”) значениям, несуще-

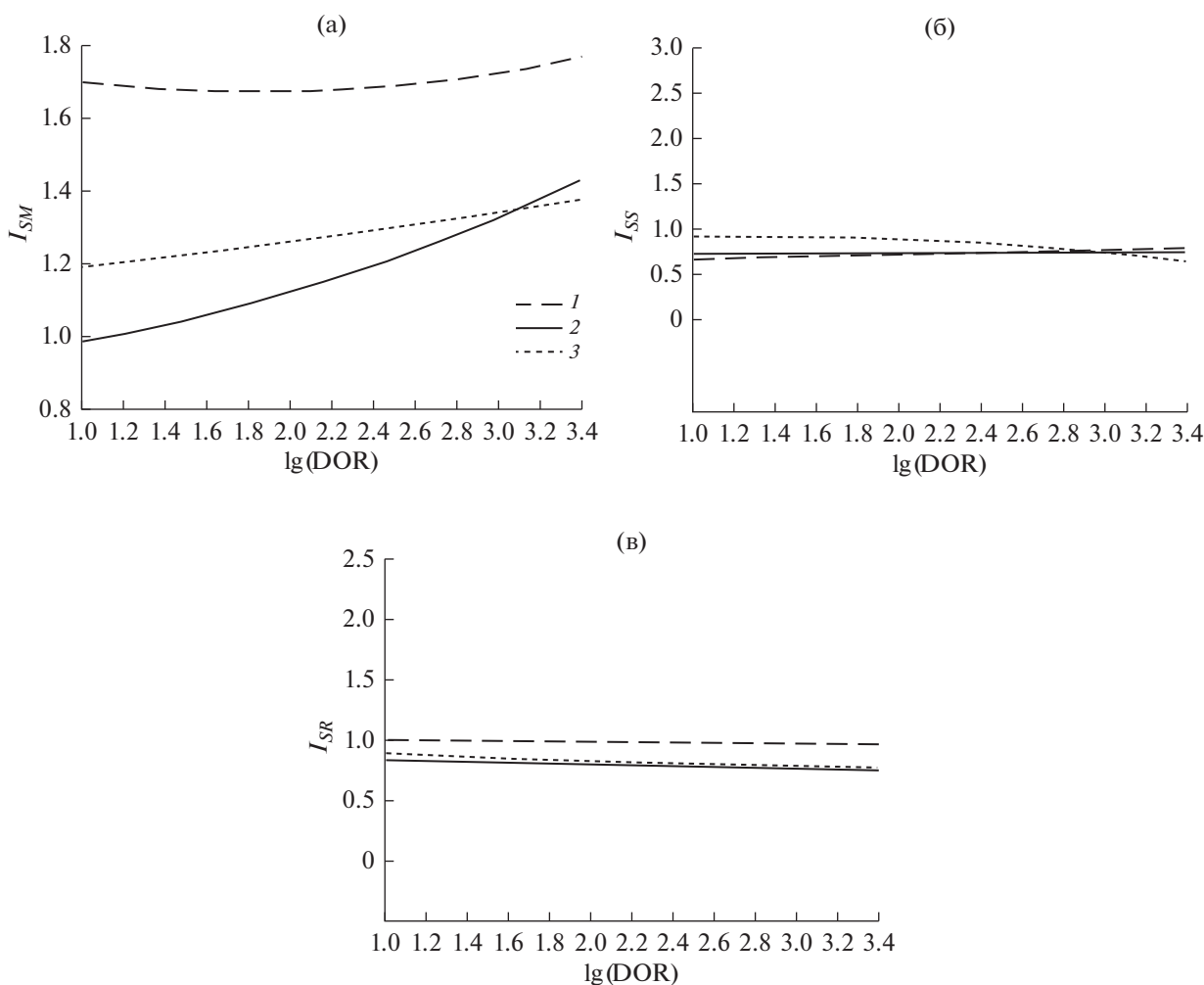
ственно меняются с изменениями степени регулирования стока водохранилищами.

Интересны результаты исследования, связанные с явлением, которое авторы назвали “перебегающей нестационарностью” (ПН). ПН заключается в том, что в изменениях стока рек такого типа сегменты реализаций стационарных случайных функций (продолжительностью порядка десятков лет) могут чередоваться с сегментами реализаций нестационарных процессов; причем, в одном и том же ряде стока могут наблюдаться нестационарности разных знаков.

В качестве примера на рис. 8 показаны изменения годовых объемов стока р. Миссисипи в створе Кеокук, расположенном в непосредственной близости от плотины водохранилища одноименного названия. Площадь водосбора, замыкаемого водохранилищем, – 308 210 км<sup>2</sup> (годовой слой стока – 192 мм), средний годовое стока в створе – 59 км<sup>3</sup>.

Если рис. 8 может дать качественное представление о тенденциях изменений стока, то график изменений  $I_{SM}$  (рис. 9) указывает на статистическую значимость наличия в ряде стационарных или нестационарных изменений. В данном случае  $I_{SM}$  рассчитывался отдельно для каждого 20-летнего сегмента ряда, и его оценки сравнивались с оценками по соседним 20-летним сегментам. Сегменты ряда конструировались “с перекрытиями” так, чтобы даты начала сегментов чередовались каждые 5 лет. Полученные таким образом результаты (оценки индекса  $I_{SM}$ ), очевидно, не будут независимы друг от друга, но большое количество сегментов желательно для того, чтобы уловить экстремальные величины индекса.

Совместное рассмотрение рис. 8 и 9 показывает, что период с начала XX в. до конца 1930-х гг. в среднем характеризовался наличием статистически значимого (на уровне 95% и намного выше) уменьшения математического ожидания процесса (средних значений); причем, ввод водохранилища в эксплуатацию не изменил эту тенденцию. Период с начала 1920-х до конца 1950-х гг., частично перекрывавший предыдущий сегмент, характеризовался в целом изменениями, близкими к стационарным. Наконец, если рассмотреть сегмент с середины 1940-х до середины 1980-х гг., то



**Рис. 7.** Зависимости индексов стационарности по математическому ожиданию  $I_{SM}$  (а), стандартам  $I_{SS}$  (б), автокоррелированности  $I_{SR}$  (в) от “степени регулирования” стока водохранилищами всех типов. 1 – годового, 2 – максимальный, 3 – минимальный сток.  $\lg(\text{DOR})$  – логарифм “степени регулирования”.

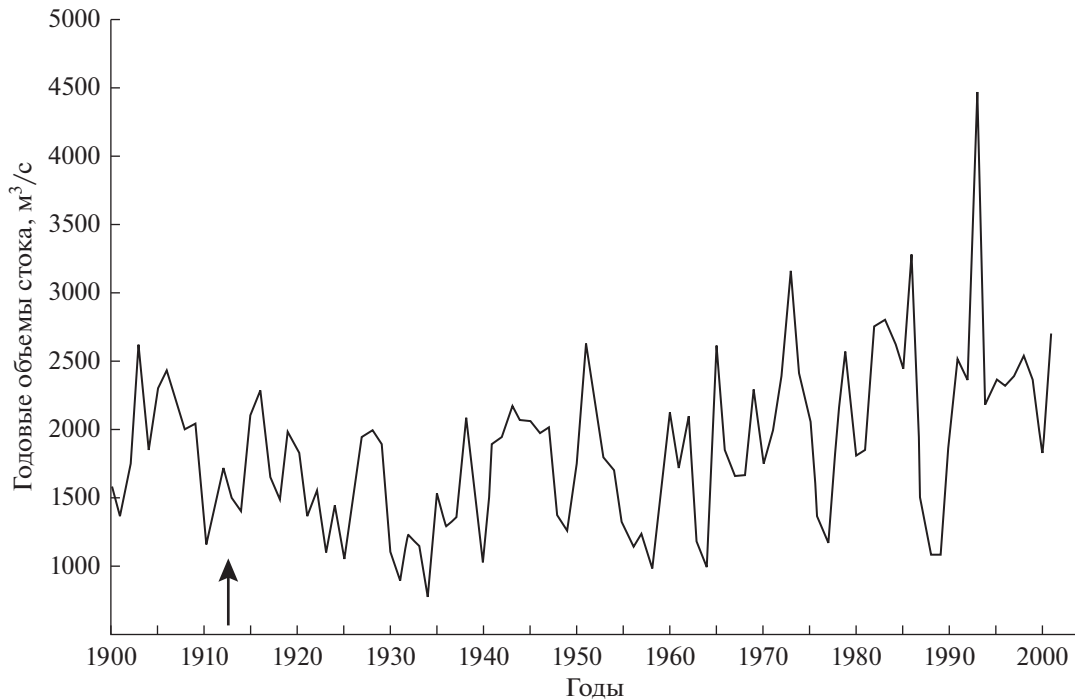
он отличается статистически значимым (на уровне  $>95\%$ ) повышением средних значений.

Приведем оценку общей значимости рассматриваемой ПН на примере рис. 9. На нем наблюдаются 3 экстремума с абсолютными значениями  $I_{SM} > 1.96$ , т.е. в  $3/13 = 0.231$  числе случаев. В случае стационарного ряда – в 0.05 числе случаев. Таким образом, превышение частоты экстремумов, выходящих за пределы “двух сигм”, существенно ( $>18\%$ ) и ПН “статистически значима”. Вместе с тем очевидно, что для единичного ряда значимость такого рода результата не показательна. Вообще, явление ПН в рассматриваемом авторами виде имеет характерные временные масштабы порядка не менее нескольких десятков лет; следовательно, соответствующие сегменты рядов укладываются в имеющиеся гидрологические ряды всего несколько раз. Так, в примере со створом Кеокук в верхнем течении р. Миссисипи

в имевшемся ряде наблюдений было всего пять 20-летних сегментов. Поэтому, для более надежных оценок необходим анализ как можно большего количества рядов с длиной  $\geq 100$  лет. В исследуемом случае – 162 ряда ежегодных значений годового, максимального и минимального стока в створах зарегулированных, незарегулированных и озерных рек.

Результаты показаны в табл. 4. Приведенные здесь величины аналогичны указанным в табл. 3 и вычислены аналогичным образом – как доли рядов с превышением числа “двухсигмовых” экстремумов над 5%, однако в табл. 4 рассматривается нестационарность не “монотонного” типа, а типа ПН.

Данные рассмотренных табл. 3 и 4 прежде всего свидетельствуют о том, что явление ПН намного более распространено, нежели случаи “монотонной” нестационарности (наличие в ряде мо-



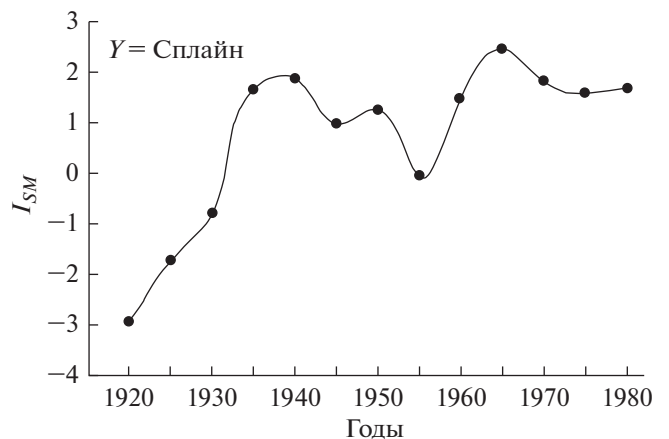
**Рис. 8.** Изменения средних годовых величин стока р. Миссисипи в створе Кеокук. Стрелкой показан год ввода в эксплуатацию водохранилища Кеокук – 1913 г.

нотонного тренда). Логически это понятно, так как сумма чередующихся в пределах одного ряда сегментов с трендами разного знака и с отсутствием трендов может в сумме дать статистически незначимое изменение.

Также обращает на себя внимание то, что частота ПН в рядах годового стока зарегулированных рек существенно более значительная, нежели в рядах рек основного типа (неозерных незарегулированных). Другая особенность результатов – почти повсеместная распространенность ПН в рядах минимального стока всех типов рек. Очевидна также близость доли рядов с ПН для зарегулированных и озерных рек. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в формировании ПН играет роль наличие на пути проникновения влаги в речное русло значительных емкостей – будь то озеро, водохранилище или емкости подземной влаги (как известно, в существенной степени формирующей подземный сток).

Сказанное подтверждается данными табл. 5, в которой приведены средние значения и стандарты  $I_{SM}$ , рассчитанные для 20-летних сегментов всех рассмотренных длинных рядов, в сопоставлении с соседними сегментами. Табл. 5 демонстрирует существенное превышение стандартов  $I_{SM}$  для зарегулированных и озерных рек по отношению к рекам основного типа, а также очень значительное увеличение стандартов для минимального стока всех типов рек. Очевидны также

почти нулевые значения средних  $I_{SM}$  для рек основного типа и для годовых значений озерных и зарегулированных рек. Отрицательные значения средних  $I_{SM}$  для максимального стока зарегулированных рек и положительные значения для минимального стока связаны, очевидно, с определен-



**Рис. 9.** Изменения индекса стационарности по математическому ожиданию  $I_{SM}$  средних годовых величин стока р. Миссисипи в створе Кеокук. Аппроксимация точек методом сплайнов.

**Таблица 4.** Доли рядов многолетних изменений годового, максимального, минимального стока, в которых наблюдается явление “перемежающейся нестационарности”

| Тип реки         | Годовой сток, % | Максимальный сток, % | Минимальный сток, % |
|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| Зарегулированные | 75              | 57                   | 100                 |
| Озерные          | 71              | 71                   | 86                  |
| Основной*        | 44              | 44                   | 89                  |

\* Неозерные незарегулированные реки.

**Таблица 5.** Средние значения и стандарты индекса  $I_{SM}$  для пар 20-летних сегментов наиболее длинных рядов годового, максимального и минимального стока рек различного типа питания

| Тип реки         | Средний годовой сток |          | Максимальный сток |          | Минимальный сток |          |
|------------------|----------------------|----------|-------------------|----------|------------------|----------|
|                  | среднее              | стандарт | среднее           | стандарт | среднее          | стандарт |
| Основной         | 0.01                 | 1.11     | -0.01             | 1.02     | 0.16             | 1.49     |
| Озерный          | 0.13                 | 1.45     | -0.04             | 1.38     | 0.07             | 1.88     |
| Зарегулированный | 0.11                 | 1.35     | -0.51             | 1.48     | 0.37             | 1.92     |

ным регулированием сезонных объемов стока водохранилищами. В многолетнем плане степень регулирования стока водохранилищами уступает размаху ПН максимального и минимального стока.

Необходимо также отметить, что дисперсии и автокоррелированности практически не имеют черт нестационарности ни монотонного, ни перемежающегося типа.

Результаты проведенного исследования указывают на то, что строительство водохранилищ самопроизвольно (не будучи запланировано проектировщиками) усиливает нестационарность речного стока – прежде всего внутреннего, перемежающегося типа. Не исключено, что оба отмеченных типа нестационарности – более общее явление, например подчинение математического ожидания величин стока стационарному процессу, описываемому, в свою очередь, случайной функцией со значительными величинами спектральной плотности на низких частотах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные водохранилища мира основных типов – гидроэнергетического и, в особенности, ирригационного назначения – сконцентрированы в пределах сравнительно четко выделяемых ареалов. Соответственно, в этих же регионах – наибольшее воздействие водохранилищ на речной сток.

Период наиболее интенсивного строительства водохранилищ обоих основных типов – 1960-е гг. Причем, в это десятилетие был введен наибольший объем водохранилищ. В последующее время наблюдалось резкое падение объемов водохранилищ – при продолжающемся росте средней высоты плотин. Это указывает на сокращение числа

вариантов наиболее “выгодных” участков рек и на удорожание последующих крупных гидротехнических сооружений. Соответственно, уменьшались темпы воздействия водохранилищ на речной сток.

Плотность вероятности (функция вероятности) всех основных параметров водохранилищ мира в первом приближении удовлетворительно описывается при помощи геометрического распределения. Примечательно, что это единственное дискретное распределение “с отсутствием памяти” и одно из немногих с максимальной информационной энтропией.

Эффект регулирования водохранилищами ирригационного назначения и всеми водохранилищами в среднем применительно к предположению о стационарности многолетних изменений стока рек сказывается в общем увеличении коррелированности стока смежных лет (как годового, так и максимального и минимального), увеличении порядка соответствующих авторегрессионных моделей, увеличении коэффициентов вариации и асимметрии.

Водоохранилища способствуют также усилению в многолетних изменениях стока регулируемых рек нестационарности “монотонного” и, в особенности, – “перемежающегося” типов. В этом отношении водохранилища, по-видимому, играют роль, аналогичную другим значительным емкостям влаги, встречающимся на пути речных потоков, – озер и подземных горизонтов.

Выявлено практическое отсутствие нестационарности обоих рассматриваемых типов водохранилищ в многолетних изменениях дисперсии и автокоррелированности как годового, так и максимального и минимального стока зарегулированных рек.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авакян А.Б., Лебедева И.П.* Водохранилища XX века как глобальное географическое явление // Изв. РАН. Сер. географическая. 2002. № 3. С. 13–20.
2. Вода России. // <http://water-rf.ru/>. (Дата обращения 2018 г.).
3. Водноэнергетические расчеты методом Монте-Карло / Под ред. Резниковского А.Ш. М.: Энергия, 1969. 294 с.
4. Водохранилища мира. М.: Наука, 1979. 287 с.
5. *Добровольский С.Г.* Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. М.: Геос, 2017. 526 с.
6. *Добровольский С.Г.* Глобальные изменения речного стока. М.: Геос, 2011. 660 с.
7. *Добровольский С.Г.* Межгодовые и многолетние изменения стока рек мира // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 6. С. 643–660.
8. *Мартин Н., Ингленд Дж.* Математическая теория энтропии. М.: Мир, 1988. 350 с.
9. *Яглом А.М.* Введение в теорию стационарных случайных функций // Успехи математических наук. 1952. Т. 7. Вып. 5 (51). С. 3–168.
10. *Яглом А.М.* Корреляционная теория стационарных случайных функций. С примерами из метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.
11. *Fishman G.S.* Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications. N.Y.: Springer-Verlag, 1996. 698 p.
12. Global Reservoir and Dam (GRanD) database (Bernhard Lehner, Catherine Reidy Liermann, Carmen Reveng and others). Version 1.1. 2011 // [www.GRand\\_dams\\_v1\\_1](http://www.GRand_dams_v1_1).
13. International Commission on Large Dams. Register of Dams // <https://www.icold-cigb.org>.
14. International Water Power & Dam Construction. N.Y.: Year Book, 2008. 525 p.
15. *Ulrych T.J., Bishop T.* Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition // Rev. Geophys. Space Phys. 1975. V. 13. С. 183–200.
16. *Yaglom A.M.* An introduction to the theory of stationary random functions. N.Y.: Prentice-Hall, 1962. 235 p.
17. *Yaglom A.M.* Correlation theory of stationary and related random functions. V. 1. Basic results. N.Y.: Springer-Verlag, 1987. 526 p.