

УДК 556.048

ОЦЕНКА РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДОМ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА КРИЦКОГО-МЕНКЕЛЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2016 г. Н.В. Осипова, И.А. Филиппова

*ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук»,
Москва, Россия*

Ключевые слова: максимальный сток, расчет характеристик стока, неоднородность, совместный анализ Крицкого–Менкеля, Байесовский подход, климатические и антропогенные изменения, районирование, смесь распределений, гидрологический режим, вероятностные гидрологические задачи.

Предложен новый подход к использованию совместного анализа данных Крицкого–Менкеля для получения обобщенных гидрологических характеристик стока. Подход позволяет не только повысить точность определяемых параметров функции распределения стока при недостатке исходной информации, но и учесть нарушения стационарности гидрологического режима, произошедшие вследствие климатических изменений.

На основе анализа многолетних рядов стока для всего бассейна выявляется смена фазы водности стока, произошедшая вследствие климатических изменений, и назначается условное деление массива данных о стоке на два временных периода, соответствующих фазам водности. Для каждого периода методом Крицкого–Менкеля рассчитываются среднерайонные параметры, позволяющие получить расчетные кривые распределения в условиях недостатка исходной гидрологической информации. Расчетные значения стока заданной обеспеченности для всего периода наблюдений получаются в результате построения совместного распределения для двух периодов по полученным на предыдущем этапе параметрам. Предложенный алгоритм рекомендуется использовать в том случае, если отмеченная нестационарность является следствием климатических изменений, произошедших на значительной территории.



Н.В. Осипова



И.А. Филиппова

Одной из приоритетных задач, сформулированных в Водной стратегии Российской Федерации до 2020 года [1], является совершенствование методов оценки и прогнозирования режима поверхностных вод в условиях нарастающего антропогенного воздействия и неопределенности климатических и гидрологических характеристик. Актуальность задачи обусловлена следующими обстоятельствами. С одной стороны, методическая база гидрологических расчетов, основанная на существенной схематизации природных процессов, далека от совершенства и не всегда позволяет получить характеристики стока и особенно экстремальных явлений с достаточной и необходимой точностью. С другой стороны, наблюдаемые флуктуации климата вынуждают отказаться от ранее принятой гипотезы стационарности гидрологических процессов, хотя действия в рамках гипотезы нестационарности не имеют на сегодняшний день достаточного информационного и методологического обеспечения [2]. Влияние климатических изменений и антропогенных воздействий на гидрологический режим зачастую выражается в нарушении стационарности наблюдаемых рядов. Это приводит к тому, что расчеты характеристик стока производятся в условиях большой неопределенности. Особые трудности при этом возникают при расчетах экстремальных характеристик – минимального и максимального стока, как величин, определяющих наибольшие риски для экономики страны. Данной проблеме в последние годы придается большое значение [3, 4], кроме того, сделаны конкретные шаги по совершенствованию методов расчета стока в нестационарных условиях [5]. Предложенный в [5] подход оправдывает себя при наличии достаточной информации о стоке, однако нерешенной остается задача расчета стока при недостатке данных наблюдений при изменении климатических условий. Известно, что при недостаточности данных наблюдений в гидрологии давно и с успехом применяется совместный анализ данных для получения территориально-общих оценок [6]. Поэтому в настоящей работе предлагается новый подход к использованию совместного анализа в условиях нарушения стационарности гидрологического режима.

ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ И МЕТОДЫ

Исследования проведены на основе данных наблюдений за максимальным стоком половодья на 25 гидрологических постах бассейна Нижней Волги.

В условиях стационарности рядов наблюдения для расчетов основных гидрологических характеристик максимального стока по рекомендации свода правил СП 33-101-2003 [6] в случае недостатка исходной информации при-

меняется методика совместного анализа Крицкого–Менкеля. Она позволяет увеличить объем используемой независимой информации за счет привлечения и обобщения дополнительных данных наблюдений с других водосборов, имеющих более или менее сходные условия формирования стока.

Основная идея, предложенная С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем, заключается в разделении дисперсии оценок параметров распределения объединяемых водосборов на две составляющие – случайную, вызванную ограниченностью выборок, и географическую, которая определяется географическими различиями (климатическими и ландшафтными особенностями водосборов). Объединение водосборов в однородный район происходит при соблюдении двух условий: первое – географическая составляющая дисперсии должна быть меньше случайной составляющей; второе – для объединенной совокупности дисперсия должна быть минимальной, что означает принадлежность объектов к общему распределению. В результате получается единая функция распределения для однородного района, параметрами которой можно пользоваться при недостатке данных о стоке реки, находящейся в выделенном районе.

Для расчета стока в нестационарных условиях применяется Байесовский подход к решению вероятностных гидрологических задач. Его применение основано на предложенной в [5] модели пространственно-временных колебаний стока в условиях изменения климата. Анализ изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги показал, что нестационарный временной ряд возможно аппроксимировать последовательностью условно стационарных состояний (участков), смена которых определяется происходящими климатическими изменениями. Это позволяет в качестве математического вероятностного аппарата для прогноза стока использовать Байесовскую методологию, позволяющую получить расчетные значения стока с учетом вероятности реализации того или иного состояния системы (в данном случае – условно стационарных периодов). Для каждого условно стационарного участка подбирается закон распределения (кривая обеспеченности), расчетная кривая обеспеченности для всего ряда строится как сумма двух законов распределения с весами, пропорциональными длинам выборок.

Задача оценки параметров распределения сводится в этом случае к раздельному оцениванию параметров для каждой компоненты. Расчетная кривая обеспеченности строится путем численного интегрирования байесовской прогнозной плотности при всех известных параметрах отдельных компонент и заданных весовых коэффициентах [5].

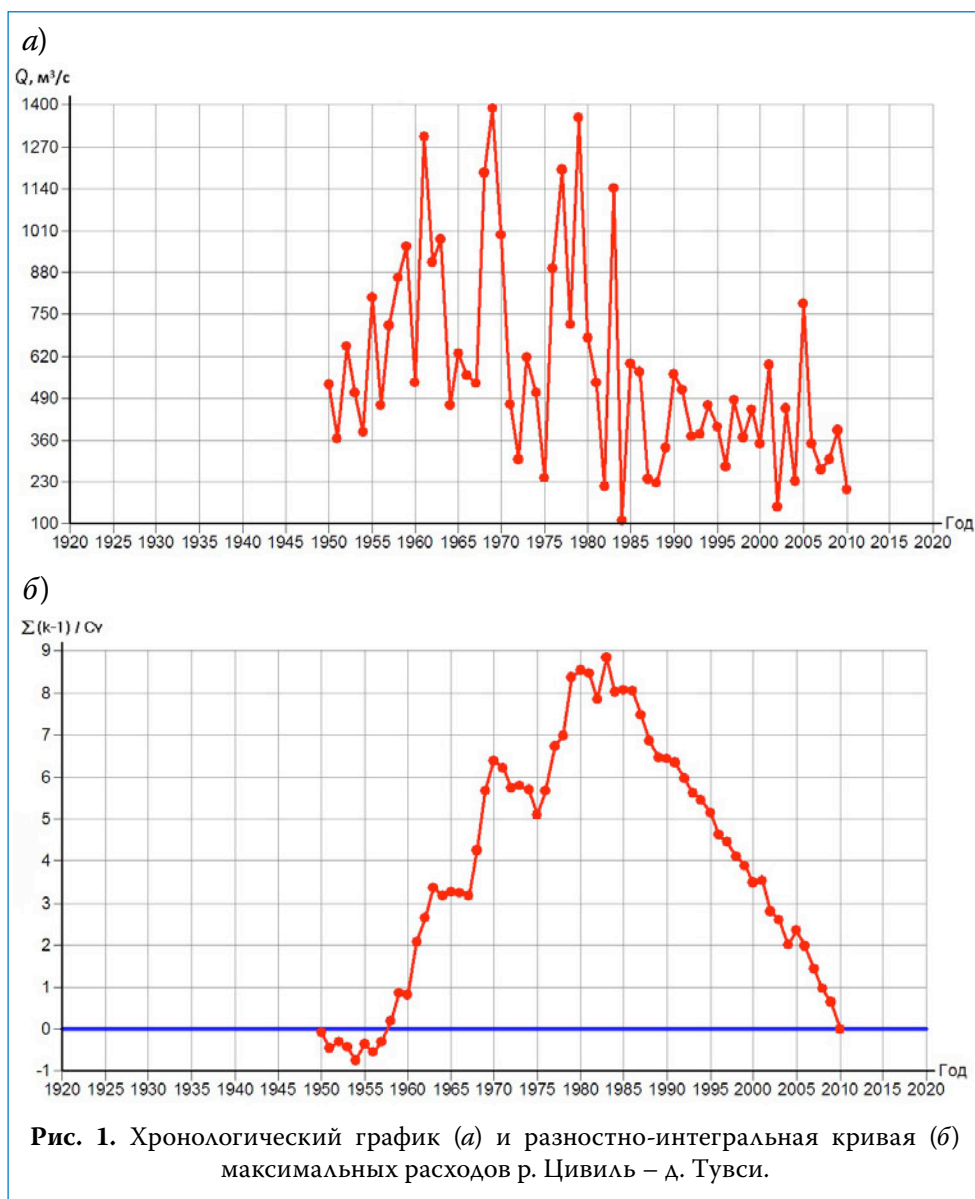
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТОКА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Для расчета характеристик стока имеется два метода: 1) разработанный для условий стационарности и применяемый при недостатке исходной информации совместный анализ; 2) Байесовский подход, разработанный для получения кривых распределения стока в условиях климатической нестациональности, но применимый при достаточном для статистического анализа количестве данных.

Основная идея данного исследования – комбинация двух методов для преодоления неопределенности в оценках параметров стока, вызванной с одной стороны, климатическими изменениями, с другой – недостатком исходной информации.

Согласно рекомендациям [5], на основе данных о максимальном речном стоке малых и средних рек Нижневолжского региона выполнен статистический анализ рядов с целью выявления в них неоднородности, вызванной антропогенными или климатическими изменениями. Далее из массива данных были вычленены нестационарные ряды и выявлена дата смены режима, которая делит наблюдаемые ряды на две условно стационарные части. Такие периоды, согласно [5], характеризуются различными условиями формирования стока. На рис. 1 продемонстрированы хронологический график и разностно-интегральная кривая максимального стока р. Цивиль. Хронологический график позволяет заметить изменение среднего многолетнего расхода в исследуемом ряду, разностно-интегральная кривая, будучи довольно эффективным аппаратом для анализа циклической структуры многолетних колебаний стока, дает возможность определить дату смены периода повышенного стока периодом пониженного стока.

Поскольку климатические изменения и их воздействие на гидрологический режим охватывают одновременно значительные территории, такое деление на условно стационарные части назначается для всего бассейна. Таким образом, для исследуемой территории имеются два массива данных о стоке, соответствующих двум условно стационарным периодам. Для пунктов, обеспеченных необходимой информацией, мы вправе применить Байесовский подход и получить искомые квантили распределения за весь период наблюдений. Открытым остается вопрос: как получить подобный результат для постов с недостатком информации? Предлагается применять совместный анализ данных для увеличения объема независимой информации и получения обобщенных кривых распределения для каждого условно стационарного периода отдельно, а затем получать результирующие характеристики с помощью Байесовского подхода. Для этого предлагается следующий порядок действий.



1. Оценка изменений гидрологических характеристик (максимального стока) в бассейне вследствие климатических изменений:

– анализ рядов на стационарность (однородность) с помощью разностно-интегральных кривых и статистических критериев Стьюдента и Фишера [7]. Выявление даты смены фазы водности для нестационарных рядов, отно-

сительно которой производится разделение ряда на условно стационарные части. Полученные для нестационарных рядов даты смены фазы водности картируются и выделяются границы областей с одинаковыми датами, условно делящими весь ряд наблюдений на два периода. Эти области характеризуются синхронностью происходящих изменений гидрологического режима [5];

– деление всех рядов стока на условно стационарные части относительно выбранной даты разбиения внутри каждой выделенной области;

– получение статистических характеристик рядов максимального стока для каждого условно однородного периода: среднего многолетнего расхода, коэффициентов вариации и асимметрии (т. е. характеристик выборочных распределений двух условно стационарных состояний) [6].

2. Получение территориально-общих характеристик методом Крицкого–Менкеля для каждого условно стационарного периода.

Выделенные при делении всех рядов стока на условно стационарные части районы принимаются однородными в климатическом отношении и с точки зрения условий стокоформирования. Для каждого условно стационарного периода производится проверка на однородность статистических характеристик и уточнение границ этих районов методом совместного анализа (по соотношению коэффициента вариации и асимметрии) [6, 8, 9].

Выделенные однородные районы характеризуются территориально-общими значениями параметра функции распределения вероятностей, что позволяет построить кривую распределения и получить квантили для рек с недостатком исходной информации. Получаем два варианта районирования бассейна и два набора характеристик функции распределения вероятностей, соответственно двум условно стационарным периодам.

3. Получение расчетных квантилей теоретического распределения вероятностей за весь период наблюдения.

Для расчета теоретической кривой распределения используется частный случай Байесовской методологии – метод «суммы распределений», что позволяет учесть присутствие в выборке значений стока, относящихся к разным условно стационарным периодам и имеющих различные механизмы формирования. В данном случае имеется набор статистических среднерайонных параметров, отвечающих двум периодам наблюдения, для каждого из которых эмпирическая кривая обеспеченности удовлетворительно аппроксимируется одной из стандартных функций распределения. Поэтому расчетная кривая обеспеченности для всего ряда строится как сумма двух функций распределения с весами, пропорциональными длинам выборок для каждого ряда, и рассчитываются квантили теоретической кривой в

виде композиции двух распределений [5]. Такая кривая характеризует соотношения, свойственные некоторому «среднему» бассейну рассматриваемой группы, учитывает нестационарность включенных в общий анализ рядов и принимается исходной для расчетов, позволяя повысить их точность.

После анализа рядов максимального стока на стационарность в бассейне Нижней Волги были выделены два района с различными датами смены стационарных состояний (1970 и 1978 гг.). В каждом районе получены статистические характеристики рядов максимального стока по имеющимся постам для двух условно стационарных периодов.

Для каждого условно стационарного периода отдельно полученные районы проверены на однородность методом совместного анализа, определены обобщенные характеристики максимального стока (табл. 1). Применение методики совместного анализа показало, что район с «датой перелома» 1978 г. неоднороден по значениям параметра C_s/C_v , поэтому в результате районирования в бассейне выделено три однородных района. Карта районов приведена на рис. 2.



Рис. 2. Картосхема расположения гидрологических постов с выделенными однородными районами по соотношению C_s/C_v для бассейнов рек Нижневолжского региона (половодье).

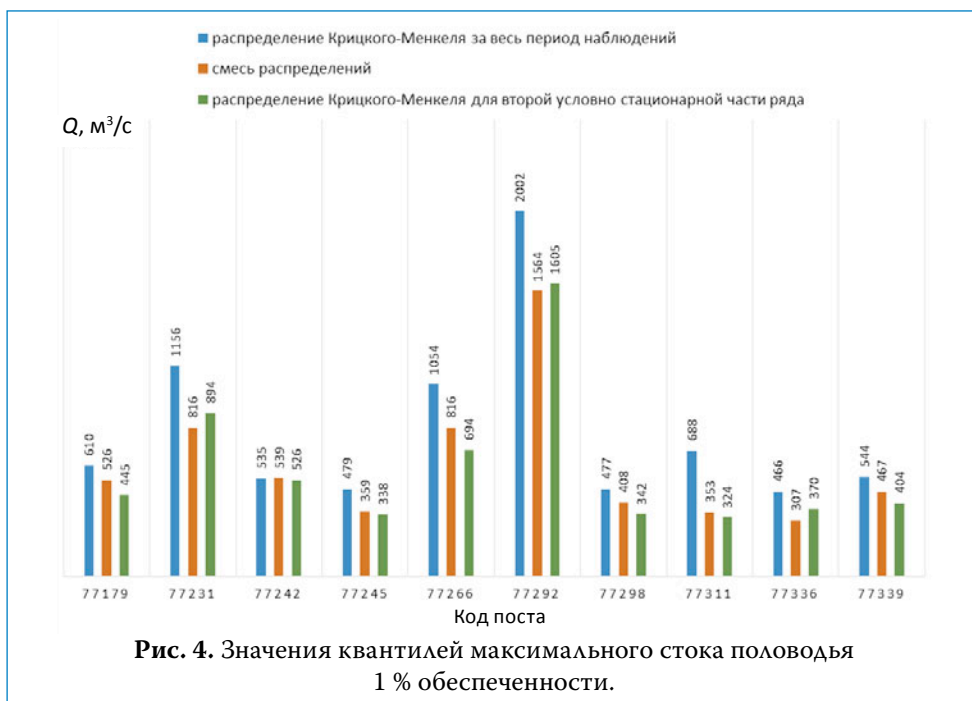
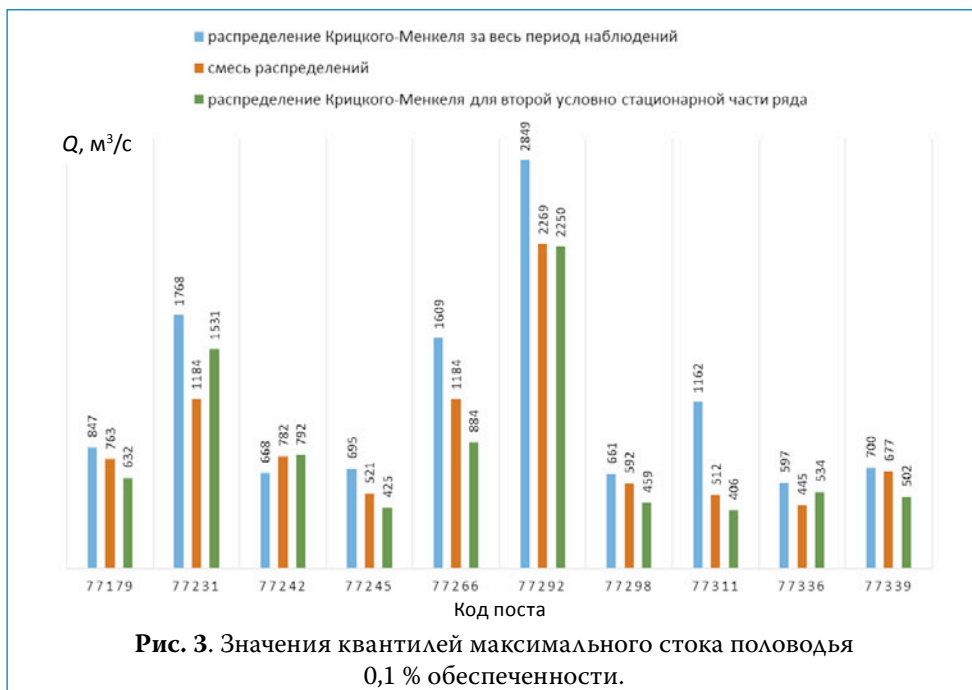
Следует отметить, что границы районов для двух условно стационарных периодов совпали, однако полученные среднерайонные оценки параметров различны. Это подтверждает факт происходящих в бассейне изменений максимального стока и свидетельствует о синхронности этих изменений для выделенных районов.

Таблица 1. Параметры объединенной совокупности Нижняя Волга

Номер района	Первый условно стационарный период				Второй условно стационарный период			
	Число постов в районе	Количество лет	Средне районные значения		Число постов в районе	Количество лет	Средне районные значения	
			C_v	C_s/C_v			C_v	C_s/C_v
1	6	216	0,67	2,03	7	247	0,79	2,6
2	15	586	0,88	2,24	14	600	0,66	1,7
3	4	125	0,44	1,66	4	132	0,59	5,3

Таблица 2. Расчетное распределение максимального стока в виде ординат кривых обеспеченности, м³/с

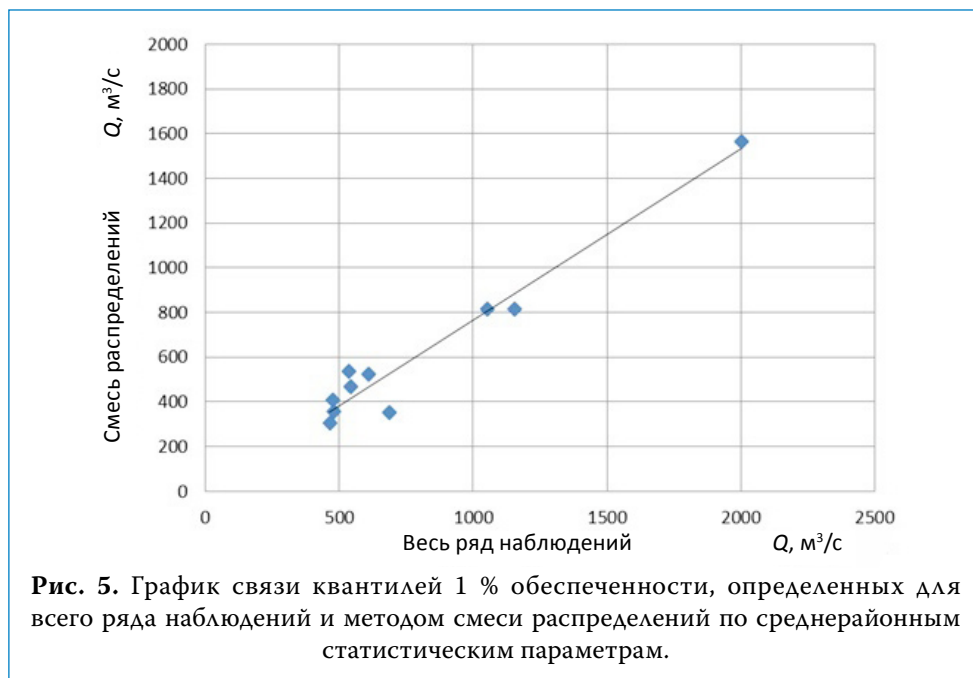
Код поста	Квантили, %								
	0,1	1	5	10	50	80	90	95	97
77112	3002	1806	1138	886	360	195	141	108	90,4
77140	1199	722	455	354	144	78,1	56,5	43,1	36,1
77164	649	390	246	192	77,7	42,3	30,6	23,3	19,5
77179	763	526	366	298	136	76,2	55,3	42,0	35,0
77231	1184	816	569	463	211	118	85,9	65,3	54,3
77242	782	539	375	306	139	78,1	56,7	43,1	35,9
77245	521	359	250	204	92,7	52,1	37,8	28,7	23,9
77266	1184	816	569	463	211	118	85,9	65,3	54,3
77292	2269	1564	1089	888	404	227	165	125	104
77298	592	408	284	232	105	59,2	43,0	32,6	27,2
77311	512	353	246	200	91,0	51,1	37,1	28,2	23,5
77329	1475	887	559	435	177	96,0	69,4	53,0	44,4
77336	445	307	214	174	79,2	44,5	32,3	24,5	20,4
77339	677	467	325	265	121	67,7	49,1	37,3	31,1



Для каждого района получены обобщенные кривые распределения за весь период наблюдений методом Байеса, что позволяет рассчитать квантили распределения для постов с недостатком гидрологической информации с учетом нестационарности режима. Примеры расчета квантилей заданной обеспеченности рядов максимального стока в нестационарных условиях (за весь период наблюдений) приведены в табл. 2. В качестве расчетных характеристик первого и второго периодов использованы значения параметров C_v и C_s/C_v , полученные для однородных районов (табл. 1).

На рис. 3, 4 представлены гистограммы квантилей максимального стока половодья 0,1 % и 1 % обеспеченности для второго района. Результаты получены для трех вариантов расчета: в первом случае рассматривается весь (полный) ряд наблюдений, во втором используется смесь распределений, построенная с использованием среднерайонных параметров (методика подробно описана выше), в третьем случае используется вторая часть ряда, т. е. данные, отражающие современный ход климатических процессов. Следует отметить, что значения квантилей, полученные по полному ряду для некоторых постов, значительно превышают получаемые характеристики стока.

На рис. 5 представлен график связи максимальных расходов 1 % обеспеченности, полученных разными методами. Связь носит линейный характер.



ВЫВОДЫ

В работе продемонстрирована возможность адаптации существующих методов расчета характеристик стока для условий нестационарности. На примере максимального стока половодья в бассейне Нижней Волги получены расчетные значения стока заданной обеспеченности при недостатке исходной информации методом Крицкого–Менкеля с учетом наблюдаемой нестационарности в исследуемых рядах. Предложенный алгоритм рекомендуется использовать в том случае, если отмеченная нестационарность является следствием климатических изменений, произошедших на значительной территории. При выявленном антропогенном воздействии каждый случай следует рассматривать отдельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 г. № 1235-р.
2. Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В.Г. Обеспечение водной безопасности – одна из важнейших задач российской экономики // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Сб. Всерос. научн. конф. 6–11 июля 2015 г. Петрозаводск, 2015. С. 14–25.
3. Водные ресурсы России и их использование. СПб.: Изд-во ГГИ, 2008. 587 с.
4. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.А. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М. 2012. С. 53–85.
5. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
6. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных гидрологических характеристик. Госстрой России. М. 2004. 74 с.
7. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определение их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
8. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1981. 270 с.
9. Осипова Н.В., Филиппова И.А. Получение территориально-общих зависимостей характеристик максимального стока половодья для бассейна реки Волги в условиях нестационарности // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Тр. IV Всерос. научн. конф. с междунар. участием. М. 2015. С. 80–82.

Сведения об авторах:

Осипова Надежда Владимировна, канд. техн. наук, научный сотрудник, лаборатория поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: osina14@yandex.ru

Филиппова Ирина Александровна, канд. геогр. наук, младший научный сотрудник, лаборатория поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: irinafil@yandex.ru