

УДК 502/504:556.18

Н. И. СЕНЦОВА

Институт водных проблем РАН

## ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНОГО РЕЧНОГО СТОКА В БАСЕЙНЕ ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА \*

*Исследуется формирование минимального речного стока в период зимней и летне-осенней межени в бассейне Верхней Волги. Выявлены периоды с повышенными и пониженными значениями меженного стока на основе статистического анализа временных рядов. Рассмотрен подход к оценке расчетных гидрологических характеристик в нестационарных условиях. На примере обработки данных наблюдений за стоком рек в бассейне Верхней Волги рекомендован байесовский алгоритм определения прогнозных (расчетных) характеристик минимального стока.*

*Минимальный речной сток, бассейн Верхней Волги, расчетные гидрологические характеристики, статистический анализ, байесовский метод.*

*Formation of the minimal river flow in a period of winter and summer-autumnal low water in the Upper Volga basin is investigated. Periods with higher and lowered values of the low-water flow are revealed on the basis of the statistical analysis of the time series. There is considered an approach to assessment of the estimated hydrological characteristics under non-stationary conditions. On the example of the observation data processing of the river flow in the Upper Volga basin the Bayesian algorithm is recommended for determination of minimal flow estimated characteristics.*

*Minimal river flow, the Upper Volga basin, estimated hydrological characteristics, statistical analysis, bayesian method.*

Формирование гидрологического режима рек зависит от комплекса природных и антропогенных факторов. Минимальный речной сток является наиболее чувствительной характеристикой водных объектов к изменению внешних воздействий. Наблюдающиеся в последние десятилетия климатические изменения заметно сказываются на формировании речного стока в межень, особенно в зимний период. Явно выраженная тенденция к повышению температуры воздуха и увеличению атмосферных осадков в холодное время года, а также оттепели способствуют росту зимнего стока рек, что отражается и на минимальных расходах.

Для решения водохозяйственных задач необходимо выявление временных периодов с разной водностью и получение расчетных гидрологических характеристик речного стока с учетом изменившихся климатических условий.

Исследование особенностей формирования речного стока проводится для

рек бассейна Верхней Волги до замыкающего створа у города Чебоксары (площадь водосбора 604 000 км<sup>2</sup>). Территория относится к зоне влажного климата, и только крайний юго-восток района находится в зоне недостаточного увлажнения. Средняя многолетняя сумма годовых осадков составляет 710...720 мм. Она изменяется по территории от 800 до 600 мм и уменьшается с северо-запада на юго-восток. Годовые суммы осадков варьируют в широких пределах. В многоводные годы суммы осадков на 33...40 % выше нормы, а в маловодные на 30...40 % ниже. В течение года осадки распределяются неравномерно. Большая часть осадков (до 70 %) выпадает в теплый период года с апреля по октябрь, максимальное значение приходится на июль. Наименьшее количество осадков наблюдается в феврале – апреле. Средняя годовая температура воздуха на рассматриваемой территории изменяется от 1,4 °С на северо-востоке до 4,6...4,8 °С на юге и юго-западе. В продолжение всей зимы наблюдаются оттепели. Величина испарения составляет в среднем 525 мм (примерно 70...80 % выпадающих

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 08-05-00807-а.

атмосферных осадков). Она увеличивается с северо-востока на юго-запад от 500 до 575 мм. Норма стока по территории района изменяется от 9 до 3 л/с·км<sup>2</sup>. На весеннее половодье приходится основное количество годового стока и, как правило, максимальные расходы воды. На большей части района сток половодья составляет 50...60 % годового. Основными факторами, определяющими формирование стока весеннего половодья, являются величины снегозапасов, количество жидких осадков в период половодья и потери на испарение и фильтрацию. Эти факторы изменяются на рассматриваемой территории в соответствии с широтной зональностью, что определяет широтно-зональное изменение средних величин слоя стока весеннего половодья. Норма слоя весеннего стока достаточно равномерно уменьшается с севера на юг от 180...160 до 50 мм.

**Формирование минимального стока в бассейне Верхней Волги.** Минимальный сток наблюдается в периоды, когда питание рек осуществляется в основном за счет притока подземных вод. Поэтому гидрогеологические условия являются одним из основных факторов, определяющих минимальный сток. Наряду с этим как меженный, так и минимальный месячный и суточный стоки зависят от одних физико-географических факторов – климата, рельефа, характера почв и грунтов, заболоченности, лесистости, озерности. Большое влияние оказывает хозяйственная деятельность человека.

Влияние климата проявляется в уменьшении минимального стока с северо-запада на юго-восток бассейна Верхней Волги, что объясняется как уменьшением подземного питания, так и снижением доли поверхностного стока в соответствии с закономерностью зонального уменьшения атмосферных осадков и увеличения испарения. На реках с площадью водосбора менее 2000 км<sup>2</sup> минимальный сток в большинстве случаев ниже зонального.

На фоне зонального изменения минимального стока отчетливо проявляется влияние рельефа. На возвышенностях в связи с увеличением эрозионного вреза и повышенным увлажнением наблюдается увеличение стока, тогда как в пределах низменных равнин при слабой расчлененности рельефа интенсивность подземного питания, а соответственно и минимального стока, уменьшается.

Минимальный сток на реках исследуемого региона наблюдается в период

зимней и летне-осенней межени. В зимний период в отдельные годы отмечается повышение стока за счет снеготаяния при оттепелях. Низкий сток летней межени почти ежегодно нарушается дождевыми паводками.

Наименьший месячный и суточный речной сток обычно наблюдается в зимний меженный период. Разница между летними и зимними минимальными значениями стока на малых и средних реках большей части территории не превышает 15...20 %, и только на отдельных реках зимние минимальные величины стока меньше летних на 30...40 %.

В результате анализа данных за многолетний период установлено, что разница между средними минимальными месячными расходами и расходами за маловодный период продолжительностью 30 дней не превышает летом 8...10 %, а зимой 5...7 %. Поэтому в качестве расчетных могут использоваться минимальные среднемесячные (за календарный месяц) расходы воды.

Летне-осенняя межень начинается обычно в конце мая – середине июня и заканчивается в октябре – начале ноября. На малых и средних реках межень наступает значительно раньше, чем на больших. Средняя продолжительность межени изменяется от 50...60 до 140...160 дней. Продолжительность наиболее маловодного периода в среднем составляет 10...15 дней. Средний слой стока за период межени изменяется от 30...35 мм на северо-востоке территории до 10 мм на юго-востоке. Минимальные средние месячные расходы в летне-осенний период наблюдаются с июля по октябрь, преимущественно в августе или сентябре. На малых реках минимальные значения отмечаются чаще в июле – августе, а на больших – в августе – сентябре. Коэффициенты вариации месячных минимальных показателей в летне-осеннюю межень изменяются от 0,2 до 0,6 (в 75 % случаев). Вследствие неоднородности условий формирования минимального стока на его колебания влияет не только изменение величины подземного питания, но и режим поверхностного стока.

Зимняя межень устанавливается в конце ноября – начале декабря и заканчивается в конце марта – начале апреля. Средняя продолжительность межени для преобладающей части района 120...140 дней. Наиболее маловодный период

наблюдается обычно в феврале – марте, продолжительность его 15...30 дней. Слой стока за период зимней межени изменяется от 30 до 5...10 мм. На малых реках сток уменьшается до 4...5 мм. Минимальные средние месячные расходы воды в зимний период наблюдаются преимущественно в январе – феврале, а в северной части района – в феврале – марте. Минимальный месячный зимний сток определяется в основном величиной подземного стока, и лишь в отдельные годы в его формировании участвует поверхностный сток. Модули среднего месячного минимального стока в пределах рассматриваемой территории уменьшаются с северо-запада на юго-восток от 3,0 до 0,5 л/с·км<sup>2</sup>. Такая закономерность характерна для средних и больших рек с площадью водосбора более 2000 км<sup>2</sup>. Коэффициенты вариации зимних месячных расходов изменяются от 0,14 до 2,0.

Минимальные суточные расходы наблюдаются преимущественно в те же периоды летней и зимней межени, что и минимальный месячный сток. Распределение средних величин минимального суточного стока по территории подчиняется тем же закономерностям, что и распределение средних месячных расходов. Между характеристиками месячного и суточного минимального стока имеется достаточно тесная прямолинейная зависимость.

**Оценка характеристик минимального стока с учетом современных климатических изменений.** Изучение характеристик речного стока и выявление различных периодов водности проводятся в основном на базе статистического анализа временных рядов гидрологических наблюдений. С этой целью в бассейне Верхней Волги исследована динамика изменения речного стока за период инструментальных наблюдений по 2007 год включительно. При этом отдельно рассматриваются изменения значений минимальных расходов воды в зимнюю и летне-осеннюю межень.

Анализ динамики годового стока рек показал, что явных изменений на реках региона не отмечается, а существующие вариации укладываются в рамки современных представлений о многолетних колебаниях речного стока, что подтверждает ранее сделанные выводы [1]. Однако меженные периоды в последние десятилетия стали значительно многоводнее. Это связано в первую очередь с повышением температуры в холодный период года и

участившимися оттепелями, способствующими увеличению зимнего стока.

Для учета нестационарности выделяются временные отрезки, характеризующиеся относительно стационарными условиями формирования минимального речного стока. Выявление групп лет с повышенными (по сравнению со средним уровнем) и пониженными значениями речного стока проведено на основе анализа разностных интегральных кривых. Исходными данными послужили временные ряды минимальных среднесуточных значений расходов воды за зимние и летне-осенние меженные периоды для основных гидрологических постов в бассейне Верхней Волги (на реках Ока, Ветлуга, Теша, Сережа).

На рис. 1 приведены совмещенные хронологические графики изменения среднесуточных минимальных расходов воды реки Оки у города Горбатова и их разностные интегральные кривые в зимнюю (а) и летне-осеннюю (б) межень. Ординаты интегральных кривых вычислялись как нарастающая сумма  $\sum (K_i - 1)/C_v$ , где  $K_i = Q_i/Q_0$  – модульный коэффициент анализируемого минимального расхода воды в  $i$ -м году ( $Q_i$ );  $Q_0$  – его средне-многолетнее значение;  $C_v$  – коэффициент вариации;  $i$  – номер года от начала рассматриваемого ряда.

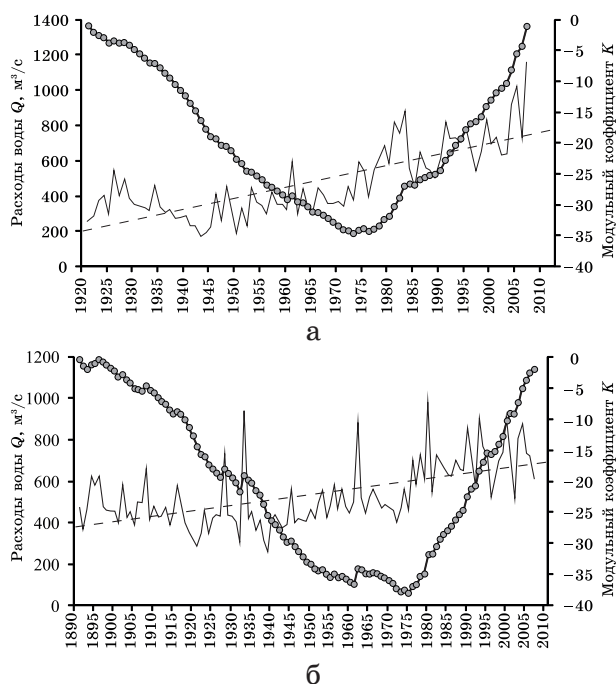


Рис. 1. Совмещенные графики динамики среднесуточных значений минимального речного стока и их разностные интегральные кривые в створе река Ока – город Горбатов: а – в зимняя; б – летне-осенняя межень; —○—  $Q$ ; —  $K$



Анализ интегральных кривых позволил выделить два условно стационарных периода. При этом точки перелома всех кривых практически совпадают и находятся в районе 1978 года, начиная с которого повсеместно наблюдаются повышенные значения минимального стока. Количественные оценки изменений речного стока за выделенные периоды с начала наблюдений до 1978 года и с 1978 года по настоящее время показали, что норма минимального стока в современный период увеличилась в среднем более чем в 1,5 раза.

Таким образом, выявленные значительные изменения формирования минимального речного стока в современных условиях требуют развития методов его обработки.

Учет нестационарности формирования речного стока является серьезной проблемой для гидрологического анализа и оценки расчетных гидрологических характеристик. Это связано как с непосредственным воздействием хозяйственной деятельности на гидрологический режим рек, так и с изменением климата.

Информацию, содержащуюся в наборе данных по региону, целесообразно привлечь для уточнения результатов статистической обработки, и сделать это возможно путем применения байесовских методов. Основные положения байесовской теории оценки изложены в [2–4].

Важный момент байесовского анализа – формирование априорного распределения, и предлагаемый подход состоит в построении априорной плотности по данным пространственного распределения изучаемого параметра. В качестве параметра, для которого ищется байесовская оценка, принимается соотношение средних значений минимального стока для двух отрезков временного ряда: с начала проведения наблюдения за речным стоком до 1978 года, и после 1978 года по настоящее время. Построение прогнозной (расчетной) плотности распределения расходов воды основывается на формуле полной вероятности. Понятно, что прогнозная плотность не является полным заданием случайного процесса, поскольку представляет собой лишь одномерный закон распределения и может быть использована только для назначения расчетных значений квантилей с учетом возможного

нестационарного поведения процесса [5].

В результате применения байесовского метода для рек в бассейне Верхней Волги рассчитаны квантили распределения минимальных значений расходов воды. В частности, в таблице приводятся расчетные значения минимальных расходов воды реки Оки у города Горбатова для зимней и летне-осенней межени. Также получена прогнозная кривая обеспеченности минимальных расходов воды, основанная на придании различных весов оценкам среднего за условно однородные периоды и вычислении прогнозной плотности с помощью формулы полной вероятности.

**Квантили распределения минимальных расходов воды в зимнюю и летне-осеннюю межени в створе «река Ока – город Горбатов», м<sup>3</sup>/с, рассчитанные методом байесовского прогнозирования**

Обеспеченность, %	Зимняя межень	Летне-осенняя межень
–1	1146	1029
5	960	875
10	865	792
25	702	653
50	496	526
75	355	436
90	283	372
95	249	339
97	229	319
99	197	284

На рис. 2 для сравнения и оценки полученных результатов приведены эмпирические кривые обеспеченности минимальных среднесуточных расходов воды для зимней (а) и летне-осенней (б) межени реки Оки у города Горбатова для двух периодов: с начала проведения наблюдений до 1978 года – 1; с 1978 года по настоящее время – 2, а также теоретическая кривая обеспеченности, построенная на основе применения метода Байеса – 3. Из рисунка видно, что полученное решение (прогнозная кривая обеспеченности 3) лежит между двумя эмпирическими законами распределения.

Таким образом, применение метода Байеса позволило уточнить расчетные характеристики минимального речного стока в бассейне Верхней Волги в современных условиях изменения климата.

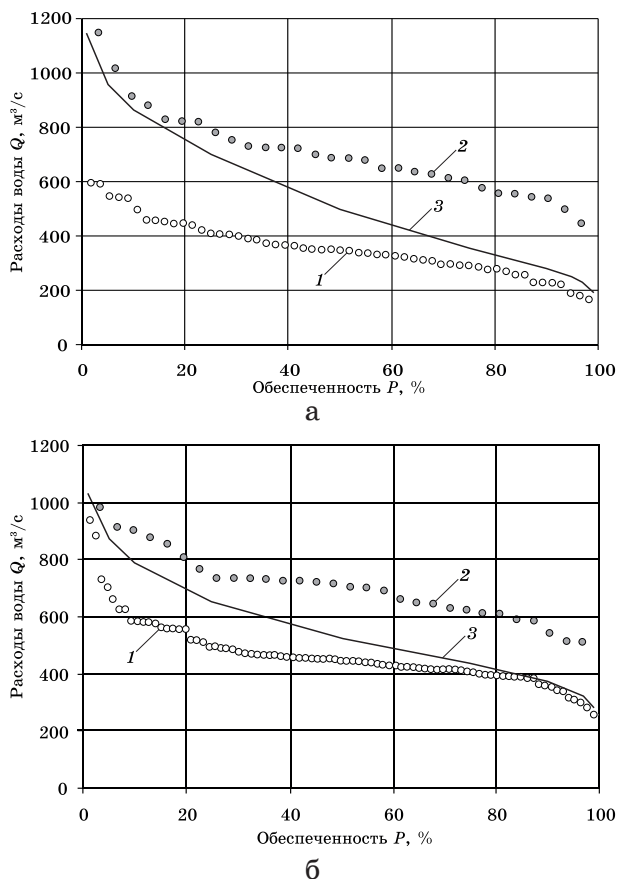


Рис. 2. Кривые обеспеченности минимальных расходов в створе «река Ока – город Горбатов»: а – зимняя межень; б – летне-осенняя межень: 1 – минимальные расходы за период до 1978 года; 2 – минимальные расходы за период после 1978 года; 3 – байесовские оценки минимальных расходов воды

### Выводы

Минимальный речной сток является наиболее чувствительной характеристикой водных объектов к изменению внешних воздействий как природных, так и антропогенных факторов. Расчетные характеристики речного стока для решения водохозяйственных задач должны быть получены с учетом нестационарности многолетних колебаний минимального стока в условиях климатических изменений. С

этой целью необходимо выявить различные (условно-стационарные) периоды и получить количественные оценки формирования гидрологического режима рек в современных условиях с использованием всех данных за многолетний период. Для получения расчетных значений гидрологических характеристик в исследовании применяются байесовские методы, позволяющие учесть выявленную нестационарность колебаний минимального стока, что весьма важно для решения задач оценки водных ресурсов и водообеспечения.

1. Сенцова Н. И. Пространственные закономерности сезонных колебаний речного стока в бассейне реки Волги / Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения: сб. науч. трудов Всероссийской конференции. – Барнаул, 2009. – С. 204–216.

2. Болгов М. В., Мишон В. М., Сенцова Н. И. Современные проблемы водных ресурсов и водообеспечения. – М.: Наука, 2005. – 318 с.

3. Рождественский А. В., Ежов А. В., Сахарюк А. В. Оценка точности гидрологических расчетов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 276 с.

4. Справочник по прикладной статистике / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана; перевод с англ. под ред. С. А. Айвазяна и Ю. Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистика, 1990. – Т. 2. – 526 с.

5. Болгов М. В., Сенцова Н. И. Байесовские оценки расчетных характеристик минимального стока рек в нестационарных условиях // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 11. – С. 70–80.

Материал поступил в редакцию 30.03.10.

Сенцова Надежда Ивановна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Тел. 8(499)135-0467

E-mail: sentsova@yandex.ru