

УДК 504.4.062.2(574)

**О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ МЕТОДОЛОГИИ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА**

Канд. геогр. наук М. Ж. Бурлибаев

В настоящее время, под прессом антропогенных факторов, преобразованы речной сток практически всех крупных водотоков Казахстана. Для целей получения объективных количественных оценок изменения естественного гидрологического режима рек необходимо разработать репрезентативные методы восстановления стока. В данной работе, в качестве одного из объективных методов восстановления стоковых характеристик предлагается использовать метод гидролого - климатических расчетов.

Влиянию антропогенной деятельности человека на гидрологический режим, водные ресурсы и качество вод посвящено множество работ как в нашей республике, так и за рубежом. В отношении Казахстана и Средней Азии аналогичные исследования рассматриваются в следующих наиболее известных трудах: Т.Н. Аткарская и И.Я. Шимельмиц (1973), С.В. Басс и Н.В. Жукова (1969), А.Н. Жиркевич (1972), Р.Д. Курдин и В.Б. Чистяков (1976), Ф.Е. Рубинова (1985), А.А. Турсунов (1985) и др.

Как правило, во всех исследовательских работах, посвящённых выявлению антропогенного воздействия на естественный гидрологический режим, в основу положены различные методы, которые можно сгруппировать в следующие три группы:

- статистические, представленные в виде уравнений регрессии (парная и множественная корреляции);
- воднобалансовые, основанные на данных Государственного водного кадастра (ГВК), Государственного учёта использования вод (ГУИВ), русловых балансов и баланса водохранилищ;
- методы физического и математического моделирования.

Перечисленные методы наряду с положительными сторонами имеют и недостатки. Как представляется, главным их недостатком является то, что выводы зависят как от надёжности исходной информации, так и от полноты и обоснованности принятых уравнений. А также в равной степени от изученности самого процесса моделируемых явлений и точности определения необходимых параметров. По мнению И.А. Шикломанова

(1979), для одних и тех же водосборов многочисленные параметры уравнений оказываются неустойчивыми или физически малообоснованными, в связи с чем не всегда удаётся надёжно рассчитать влияние на сток в замыкающем створе. Самым надёжным из всех перечисленных способов является метод гидрологических экспериментов, но дороговизна этого метода делает его недоступным. Как видно из объединения этих методов в отдельные группы, они отличаются между собой не только генетически, но и подчинённостью для решения разнохарактерных задач в зависимости от поставленных целей. В нашем же случае мы решаем теорию устойчивости речной экосистемы путём определения воздействия весеннего половодья, что в свою очередь невозможно без восстановления естественного хода гидрологического режима. Из всего комплекса антропогенных факторов, изменивших в корне естественный гидрологический режим рек в условиях Казахстана, основными являются зарегулированность речного стока (как во времени, так и в пространстве) водохранилищами сезонного и многолетнего регулирования, безвозвратное водопотребление на орошение. Как показывает факторный анализ, применение выше перечисленных методов, при существующей гидрологической сети Казахстана, весьма ограничено. Поэтому, нами в качестве основного метода был использован метод расчёта естественного стока по климатическим факторам. При этом исходным служил тот факт, что современное изменённое состояние климата пока ещё не влияет существенно на условие формирования речного стока, в связи с чем климатические факторы рассматриваются нами как наименее подверженные антропогенному воздействию (по данным зарубежных и отечественных учёных на изменение климата на $0,5 \div 1,0$ °C необходим интервал времени в сто лет).

Для определения среднегодовых и среднемесячных величин естественного стока целесообразно использовать метод гидролого-климатических расчётов (ГКР), предложенный профессором В.С. Мезенцевым [7]. Этот метод учитывает величину атмосферных осадков, речного стока, коэффициента стока, а также максимального возможного испарения. Основной характеристикой при этом является определение величины максимального возможного испарения, которая рассматривается как эквивалент теплоэнергетических ресурсов климата. Теплоэнергетические ресурсы процесса испарения для любого расчётного промежутка времени определяется как

$$L Z_{mi} = R_i^+ + P_i^+ + \Delta B_i - \Delta Z_{mi}, \quad (1)$$

где Z_{mi} - максимальное возможное испарение, мм; L - скрытая теплота испарения, ккал/см³; R_i^+ - положительная составляющая радиационного баланса, ккал/см²; P_i^+ - положительная составляющая турбулентного теп-

лообмена, ккал/см^2 ; ΔB_i - изменение теплозапасов деятельного слоя почвы, ккал/см^2 ; ΔZ_{mi} - расход тепла на таяние снега, льда, прогревание почвы, ккал/см^2 .

Однако, из-за ограниченности материалов по радиационному режиму, турбулентному и почвенному теплообмену использовать уравнение (1) в условиях Казахстана в практических расчётах не всегда удаётся. И не только этот фактор является основным сдерживающим звеном при применении ГКР. В частности, исследования З.И. Пивоваровой [8] показали, что для успешного применения метода ГКР в практических расчётах, оптимальное расстояние между актинометрическими станциями не должно превышать 100 км. А это, к сожалению, при существующей сети актинометрических станций Казахстана не выполняется. Поэтому нами разработана методика и программное обеспечение расчётов максимального возможного испарения по имеющимся массовым метеоданным. На основе анализа имеющихся режимных наблюдений по территории Казахстана, нами установлены количественные связи месячных величин положительной составляющей радиационного баланса с дефицитом влажности воздуха (ДВВ), в зависимости от различных физико-географических условий для каждого речного бассейна в отдельности.

При этом полученные связи носят петлеобразный (гистерезис) характер и аппроксимируются для восходящей и нисходящей ветвей в отдельности, то есть:

- восходящая ветвь (период роста дефицита влажности воздуха)

$$R_{mi} = \alpha + \beta \lg d_{mi}, \quad (2)$$

- нисходящая ветвь (период спада дефицита влажности воздуха)

$$R_{mi} = c + e d_{mi}, \quad (3)$$

где d_{mi} - среднемесячные величины дефицита влажности воздуха, мб; α , β , c , e - эмпирические градиенты, зависящие от физико-географических условий каждого речного бассейна.

Зависимости (2) и (3) характеризуются корреляционными отношениями: $r = 0,96 \dots 0,91$ и $r = 0,98 \div 0,88$. При этом они учитывают поправки к эффективному излучению. Полученные характеристики этих зависимостей показывают, что наибольшая теснота связи обеспечивается для бассейнов рр. Ишим и Тобол, где корреляционные отношения при подъёме и спаде дефицита влажности воздуха соответственно равняются 0,96 и 0,97. Относительно слабой теснотой связи характеризуется бассейн р. Чу, где при подъёме и спаде дефицита влажности воздуха корреляционные отношения достигают, соответственно 0,91 и 0,95 /1/. При выполнении расчё-

расчётов в единицах измерения системы СИ, в зависимостях (2) и (3), вводится переводной коэффициент, равный 41,9.

На основе анализа полученных зависимостей дефицита влажности воздуха от положительной составляющей радиационного баланса, по 42 пунктам, расположенным в различных физико-географических условиях республики, эти результаты обобщены по конкретным речным бассейнам рек (с помощью определения центра тяжести), для восстановления естественного хода гидрологического режима.

При определении остальных членов уравнения (1) необходимо придерживаться рекомендаций приведённых в /7/. Например, годовая сумма адвективного потока тепла рассчитывается как

$$P_2^+ = 6,8 - 0,082R_r, \quad (4)$$

где R_r - скомпенсированный радиационный баланс, ккал/см².

Внутригодовое распределение положительной составляющей турбулентного теплообмена (P^+) определяется согласно рекомендациям Г.В. Белоненко и В.Е. Валуева /4/ и для условий Казахстана выглядит следующим образом:

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Го
13.0	11.0	9.0	7.0	6.0	5.5	5.5	6.0	6.0	8.0	10.0	13.0	10

Так как показатель изменения теплозапасов деятельного слоя почвы (ΔB) для любых почвенных условий по своей величине намного меньше остальных составляющих уравнения (1), то при его оценке необходимо пользоваться довольно простыми оценочными методами. Например, с достаточной точностью в практических расчётах ΔB можно определить, согласно рекомендациям М.И. Будыко /5/, по годовой амплитуде температуры воздуха. Рассчитанные нами величины ΔB , для условий Казахстана, представлены в работе /1/.

Для достоверности полученных результатов, нами сравнивались восстановленные стоковые характеристики с измеренными расходами воды за периоды естественного гидрологического режима рек. И эти результаты показывают, что расхождения между величинами восстановленного (расчитанного) и измеренного в среднем составляют от 5 до 15 %, хотя на примере отдельных рек и в отдельные выдающиеся месяцы эти расхождения могут составлять (единичные случаи) и до 25 %. Наименьшие расхождения между восстановленными и измеренными расходами воды наблюдаются на примере рек Или, Иртыш, Ишим, Урал и Нура, где осреднённые значения расхождений колеблются в пределах от 3 до 19 %. Максимальные расхождения зафиксированы по таким рекам как Сырдарья, Чу, Талас и Асса - от 11 до 24 % от измеренных стоковых характери-

стик, в результате чего нами ставятся под сомнение периоды с естественным гидрологическим режимом для этих рек, где водосборы являлись зоной традиционного орошения, и начало влияния хозяйственной деятельности на режимы уходят в прошлые века.

Необходимо отметить, что для всех крупных рек Казахстана, получены количественные величины восстановленных стоковых характеристик, для периодов интенсивного изменения гидрологического режима и при заинтересованности использования этих характеристик в практических целях они могут быть нами представлены. Также проанализированы за различные периоды S_v и S_s . При сравнении характеристик восстановленного и измеренного расходов воды за условно естественный период некоторую трудность представляет определение начала интенсивной хозяйственной деятельности в отдельных бассейнах рек. Поэтому при определении начала хозяйственного освоения бассейнов и анализа однородности гидрологических рядов целесообразно начинать расчёты с построения суммарных интегральных кривых связи $\sum Q = f(T)$, поскольку основное свойство их заключается в том, что при неизменном режиме колебаний гидрологических характеристик суммарная интегральная кривая является осреднённой прямой линией, а при нарушении естественного хода гидрологического режима она отклоняется от прямой под углом, что фактически определяет начало хозяйственного освоения.

Как отмечалось нами ранее, вследствие регулирования стока водохранилищами и безвозвратных заборов воды происходит выравнивание внутригодового распределения стока за счёт увеличения зимних расходов (при наличии ГЭС на водохранилищах) и уменьшения стока в период весеннего половодья и паводка за счёт срезки их пика для целей аккумулярования. Исследования показывают, что наибольшие изменения терпели сток рек Сырдарья, Чу, Талас и Асса.

В настоящее время из всего комплекса антропогенных факторов, влияющих на естественный гидрологический режим рек в условиях Казахстана, основным является безвозвратное потребление воды на орошение. Причём эти безвозвратные потери характерны не только для условий Казахстана, (на примерах Сырдарья, Чу, Талас, Асса и Или, которые являются по сути трансграничными реками), но и для сопредельных государств.

По уровню водохозяйственного освоения бассейн р.Сырдарья можно разделить на два этапа: период незначительного водохозяйственного строительства (с 1948 по 1960 гг.); период крупномасштабного освоения бассейна, начиная с 1960 г. Характеристики уменьшения стоковых вод р.Сырдарья на 30 и 40 % до 1975 г. в створах "Тюмень - Арык" и "Казалинск", полученные нами, подтверждаются и результатами исследования Ф.Э. Рубиновой (1979). За период с 1975 г. по настоящее время в

указанных створах естественный сток уменьшается соответственно на 83 и 92 %. Как показывают наши исследования, в результате забора воды на орошение и на промышленные нужды г. Тараз сток р. Асса уменьшился на 93 %. Практически вода перестала поступать в оз. Библиколь, независимо от водности года, что в свою очередь сильно влияет на экосистему. На р. Или, в створах расположенных в 37 км ниже посёлка Или и Ушжарма, величина стока при обеспеченности $P = 50\%$ уменьшилась соответственно на 21,8 % и 32 %, а в отдельные маловодные годы эти изменения составляют от 25 до 40 %.

Необходимо отметить, что среднеголетние значения снижения стока рек Или, Иртыш, Урал являясь сглаженной величиной, никоим образом не отражают сути тех изменений, которые происходят во внутригодовом распределении стока. Например, для максимальной выработки электроэнергии на ГЭС в зимние месяцы осуществляются попуски из водохранилищ, равные по своей величине максимальным расходам весеннего половодья, что в несколько раз выше зимних расходов при естественном ходе гидрологического режима.

Изменения естественного внутригодового и среднеголетнего распределения стока практически повсеместно привело к изменению C_v и C_s . Оно характерно как для среднегодовых значений стока, так и для значений за отдельные периоды, которые разделены нами на четыре расчётных периода: холодный, тёплый, месяц с максимальным стоком, среднегодовое значение стока. Из анализа результатов видно, что наибольшему изменению подвержена C_v месяца с максимальным стоком, выявленная на примере всех крупных рек республики. Например, C_v р. Ишим под влиянием хозяйственной деятельности в месяц с максимальным стоком составило 0,29 против 1,13 наблюдаемых при естественном гидрологическом режиме. Одновременно уменьшилась и C_s с 1,69 до 0,30. Аналогичные изменения характерны и для р. Урал, где C_v претерпел изменения от 0,74 до 0,26 при уменьшении C_s с 0,99 до 0,70. Для р. Тобол изменение C_v составляет от 1,00 до 0,31 при увеличении C_s с 1,38 до 2,40, что означает стабилизацию стохастичности стоковых характеристик, наблюдавшихся при естественном гидрологическом режиме.

Подводя черту вышесказанному, считаем, что метод гидролого-климатических расчётов для применения в практических целях (то есть для восстановления стоковых характеристик в условиях Казахстана), вполне отвечает предъявленным требованиям и показывает высокую степень надёжности и поэтому может быть рекомендована для использования. При этом необходимо подчеркнуть, что применению ГКР должно предшествовать обязательное наличие режимных наблюдений как за гидрологическим режимом, так и за отдельными элементами водного баланса. Отсутствие же этих данных сводит на нет применение этого метода и ста-

вить перед исследователями вопрос о восстановлении стоковых характеристик при отсутствии наблюдений.

При полном отсутствии данных наблюдений за гидрологическим режимом или за отдельными элементами водного баланса, эту задачу решают приближенно, используя соответствующие карты: норм стока, коэффициентов вариации и др., или же применением методов аналога. Необходимо подчеркнуть, что этот путь достаточно трудоёмкий, кроме того, в условиях недостаточности густоты пунктов наблюдений, в значительной степени субъективен. Более перспективным методом получения (восстановления) гидрологического ряда как для неизученных створов, так и для неизученной реки в целом является метод оптимальной пространственной интерполяции (ОПИ) /6/. Оптимальная пространственная интерполяция - это один из методов объективного анализа, получивший широкое распространение при изучении метеорологических полей. Он предназначен для определения значения анализируемого элемента в заданной точке по значениям на соседних станциях с наименьшей (в статистическом смысле) средней квадратичной ошибкой. Методические основы и особенности этого метода к полям гидрологических элементов изложены в работах Г.А. Алексеева /2, 3/. Метод ОПИ строго применим только к статистически однородным и изотропным полям, поэтому перед решением задачи интерполяции необходимо установить, удовлетворяет ли этим условиям поле рассматриваемого элемента. Однородным является поле, отвечающее одинаковым законам распределения вероятностей гидрологической характеристики в каждом пункте наблюдений (одинаковые параметры и типы распределения). В ряде случаев условие однородности выполнить достаточно просто, используя нормировки типа:

$$R_{ij} = M_{ij} / \bar{M}_j \text{ или } R_{ij} = (M_{ij} - \bar{M}_j) / \sigma_j, \quad (5)$$

где M - гидрологическая характеристика; i - индекс времени; j - индекс пункта.

Сложнее выполнить условие изотропности поля. Теоретически изотропным считается такое поле, для которого пространственная корреляционная функция (ПКФ) зависит только от расстояния между пунктами и не зависит от направления между ними. В этих случаях оценить изотропность поля можно по эмпирической пространственной корреляционной функции. Для поля стока, представленного временными рядами, вычисляется матрица парных коэффициентов корреляции $\| r \|$ и матрица расстояний между центрами тяжести водосборов $\| \rho \|$. На основании полученных расчётов строится зависимость парных коэффициентов корреляции от расстояния между центрами тяжести водосборов. Эмпирические точки в поле координат $r - \rho$ обычно располагаются довольно широкой

полосой. Рассеивание коэффициентов корреляции в поле координат связано со случайными отклонениями, обусловленными ограниченностью принятых в расчёт выборок, или же с невыполнением изотропности анализируемого поля вследствие природных особенностей.

Оценка территориальной однородности ПКФ производится с использованием преобразования Фишера к величинам η_j и $\gamma(\rho)$. Полученные величины Z , в отличие от коэффициентов парной корреляции r , подчиняются нормальному закону распределения при любых значениях r [2]. При нормальном законе распределения Z в доверительные интервалы $\pm\sigma_z$ и $\pm 2\sigma_z$ из общего количества точек должно попасть соответственно не менее 68,3 и 96,4 %. Если эти условия выполняются, то ПКФ считается однородной, а соответствующее поле изотропным. В противном случае исходное поле рассматриваемого элемента должно быть уменьшено. Анализы полученных пространственных корреляционных функций стока рек Казахстана, по отдельным месяцам за периоды естественного гидрологического режима, показывают, что они оказались неоднородными и поэтому для выделения изотропных полей выполнено разделение территории по условиям формирования стока. Оказалось целесообразным различать два района: реки, формирующие свои стоки на равнине (условно это реки Центрального и частично Западного Казахстана) и реки с формированием стока в горах. Корреляционные функции, вычисленные для относительно равнинных рек оказались однородными. Средневзвешенные ПКФ в целом удовлетворительно описываются зависимостью $r = 1 - \alpha\rho$, где α - градиент поля для месячного стока, что существенно упрощает интерполяцию величин стока. Менее однородны ПКФ для рек другого района (формирующих свои стоки в горах и где выделяется зона использования стока в равнинах) так как данная территория более разнородна по стокоформирующим условиям, а также больше подвержена антропогенным факторам. В этих зонах ПКФ имеют криволинейный вид и соответственно описываются экспоненциально - степенными функциями $r = \exp(-\alpha\rho^\beta)$, где α и β - эмпирические градиенты.

Алгоритм ОПИ сводится к следующему. Значение гидрологической величины в любой точке поля можно вычислить как

$$X_{oi} = \sum_{j=1}^k p_j x_{ij}, \text{ где } (j = 1, 2, \dots, k) \quad (6)$$

где x_{ij} - значение элемента в i -ой строке на j -ой влияющей станции; p_j - весовые коэффициенты; k - число влияющих рек - аналогов.

Чаще уравнение решают для отклонений от среднего, то есть в виде

$$X_{oi} = \bar{x}_o + \sum_{j=1}^k p_j \Delta x_{ij}, \quad (7)$$

где x_{oi} - норма гидрологической характеристики в точке интерполяции; Δx_{ij} - отклонение от нормы на реках - аналогах в i -й срок. После определения количества влияющих станций составляется система линейных уравнений для определения интерполяционных весов p . В общем виде система уравнений выглядит как:

$$\sum_{j=1}^k r_{ij} p_j = r_{oi}, (i = 1, 2, \dots, k), \quad (8)$$

где r_{ij} - значение парных коэффициентов корреляции между влияющими станциями; r_{oi} - то же самое между пунктами интерполяции и влияющими станциями; r_{ij} и r_{oi} - определяются функциями $r(\rho)$ по значениям ρ_{ij} и ρ_{oi} ; p_j и p_i - интерполяционные веса. По изложенному алгоритму проведено восстановление стока ряда рек Казахстана. Процедура интерполяции для отдельных гидропостов осуществлялась с целью оценки погрешности метода восстановления в точке. Количество влияющих на данный узел постов выбирается в зависимости от наличия данных по стоку за конкретный срок наблюдений, а также от расстояния между гидропостами. Следовательно, совокупность влияющих рек - аналогов не остается постоянной, а система (8) также оказывается различной для разных периодов. Реальное число гидропостов, привлекаемых к процедуре интерполяции, меняется от двух до шести. Для получения результатов, с требуемой в практике точностью, достаточно трёх аналогов. После решения (8) интерполяцию по точкам поля можно проводить с помощью уравнения (6). Для интерполяции по (7) необходимо знать норму гидрологической характеристики в заданной точке интерполяции, которую можно определить одним из следующих способов: а) по картам гидрологической аналогии; б) ОПИ по значениям норм.

Выполненная интерполяция имеет среднюю квадратичную ошибку

$$\varepsilon^2 = 1 - \sum_{j=1}^k r_{oj} p_j, \quad (9)$$

Не выполняя интерполяции, по величине ε можно оценить возможную точность интерполяции. Её можно использовать для поиска гру-

бых ошибок в данных наблюдений. При анализе результатов интерполяции в значениях характеристик стока можно обнаружить ошибки двух типов: в фактическом материале и в пространственной интерполяции, которые, в свою очередь, зависят от различий в условиях формирования стока и выбора репрезентативных аналогов. В большинстве случаев - близкое расположение гидропостов обеспечивает сходность физико - географических условий и высокие значения парных коэффициентов корреляции. Среднеквадратические ошибки ОПИ месячных величин стока в среднем составляют $10 \div 20 \%$, хотя в отдельные месяцы могут наблюдаться и большие отклонения. Годовые же значения гидрологических характеристик определяются с большей достоверностью. Суммарная относительная ошибка интерполяции и исходных данных в процентах от средних величин модуля стока составляет 5-10 %. Поэтому контроль восстановленных месячных величин необходимо осуществлять путём сопоставления суммы месячных величин за год с годовыми значениями. Если невязка получается меньше допустимой, то её распределяют помесечно пропорционально абсолютным величинам. В противном случае требуется дополнительный анализ как исходной информации, так и репрезентативности аналогов.

Таким образом, метод оптимальной пространственной интерполяции может использоваться для определения ошибок интерполяции и для восстановления стока на реках при отсутствии данных наблюдений не только для годовых интервалов времени, но и в ряде случаев за более короткие периоды наблюдения (сезон, месяц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрасилов С.А., Бурлибаев М.Ж., Волчек А.А. О некоторых методах восстановления стока // Вестник КазГУ, сер. геогр. - 1998. - №6. - С. 92-100.
2. Алексеев Г.А. Методы оценки случайных погрешностей гидрометеорологической информации. - Л.: Гидрометеиздат, 1975. - 95 с.
3. Алексеев Г.А. Объективные методы интерполяции и выравнивания корреляционных связей. - Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 363 с.
4. Белоненко Г.В., Валуев В.Е. Внутригодовое распределение теплоэнергетических ресурсов и максимально возможного испарения Гидротехника и мелиорация в Западной Сибири. - 1974. - Т.18. - С. 58-64.
5. Будыко М.И. Климат и жизнь. - Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 470 с.
6. Бурлибаев М.Ж., Волчек А.А. Вопросы восстановления стока рек. - М., 1987. - Деп. ЦБНТИ Минводхоза СССР, 8.12.87. № 529, 14 с.

7. Мезенцев В.С., Белоненко Г.В., Карнацевич И.В. Гидрологические расчёты в мелиоративных целях. - Омск, Изд - во Омского СХИ. -1980. - 84 с.
8. Пивоварова З.И. Изучение режима солнечной радиации СССР. //Современные проблемы климатологии / Под редакцией М.И. Будыко. -Л.: Гидрометеиздат, 1976. - С. 41- 45.

Казахский научно - исследовательский институт
мониторинга окружающей среды и климата

ӨЗЕН АҒЫНДЫЛАРЫН ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ МЕТОДОЛО- ГИЯСЫНЫҢ КЕЙБІР ПРОБЛЕМАЛАРЫ ТУРАЛЫ

Геогр. ф. канд. Бурлібаев

Қазіргі дауірдегі антропогендік факторлардың нәтижесінде Қазақстанның барлық өзендерінің су ағындары толық өзгертілген. Табиғи гидрологиялық режимінің өзгеруінің әділ сандық бағасын алу үшін су ағынын қалпына келтіру методикаларын өңдеу керек екендігі бүгіндікте айқын болып отыр. Бұл жұмыста су ағынын қалпына келтіру әдісі ретінде еңбір әділ деп гидролого - климатологиялық есептеу әдісі ұсынылады.