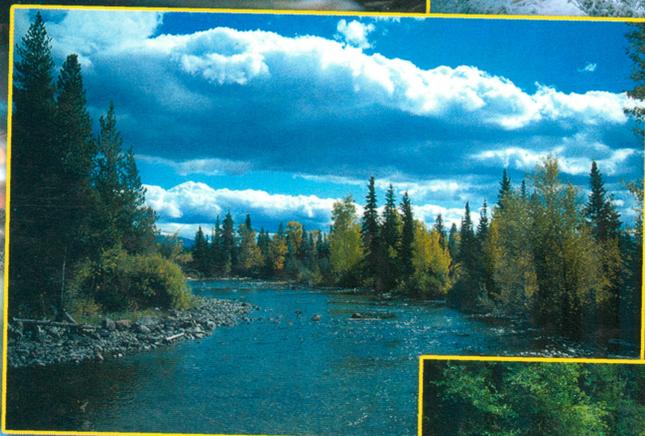
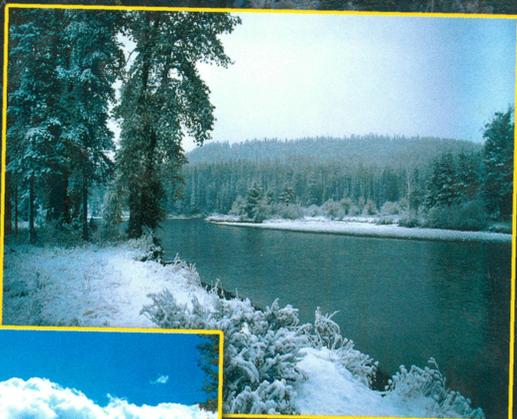


Н. С. Лобода



**РАСЧЕТЫ И ОБОБЩЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ГОДОВОГО СТОКА
РЕК УКРАИНЫ В УСЛОВИЯХ
АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Одесский государственный экологический университет

Н. С. ЛОБОДА

**РАСЧЕТЫ И ОБОБЩЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК
ГОДОВОГО СТОКА РЕК УКРАИНЫ
В УСЛОВИЯХ
АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ**

Одесса
«Экология»
2005

ББК 26.22
Л683
УДК 556.16

Монография посвящена разработке теоретических основ методов оценки водных ресурсов Украины в условиях антропогенного влияния, которое включает в себя водохозяйственные преобразования и изменения глобального климата. Дано новое решение поставленной проблемы, заключающееся в создании комплексного подхода к оценке характеристик годового стока рек Украины, при котором процесс формирования стока и его математическое моделирование рассматриваются в последовательности «климат — подстилающая поверхность — естественный сток — бытовой сток». Книга рассчитана на научных и практических работников в области изучения и использования водных ресурсов, а также для студентов и аспирантов гидрологических, гидротехнических и гидромелиоративных специальностей высших учебных заведений.

Monograph is devoted to developing theoretical principles of Ukrainian surface water resources evaluation under conditions of anthropogenic impact, including watermanagement transformation and global climatic change. New solving of the problem is proposed. The complex approach for definition of annual runoff characteristics is realized. Forming of flow process and it's mathematical modelling is considered in sequence «climate — underlying surface — natural runoff — lifeconditioned runoff». The book is intended for researches and operational personnel in the area of study and use of water resources, and also for students, post graduates of hydrology, hydrotechnical and hydromelioration specialities of higher educational establishments.

Рецензенты: **А. А. Светличный**, д-р геогр. наук, проф.,
С. Г. Нусимович, канд. техн. наук, доц.

Рекомендуется к изданию Ученым советом
Одесского государственного экологического университета.
Протокол № 11 от 27.11.2003 г.

Автор искренне выражает свою признательность и благодарность доктору географических наук, профессору Е. Д. Гогченко за ценные указания и советы по составлению книги и полезное обсуждение многих рассмотренных в ней вопросов

ВВЕДЕНИЕ

Сложность современных водохозяйственных систем, многозначность в прогнозных оценках изменений гидрометеорологического режима в будущем, недостаток данных наблюдений за стоком и водопотреблением в настоящем определяют необходимость использования имитационного математического моделирования для расчетов характеристик стока.

Основой большинства математических моделей стока в условиях антропогенного влияния являются естественные (не преобразованные хозяйственной деятельностью) водные ресурсы территории. При оценке и обобщении характеристик естественного стока методами традиционных гидрологических расчетов основные трудности заключаются в отсутствии надежных данных по учету и водопотреблению на малых и средних реках Украины, нестационарности временных рядов стока, возникающей вследствие водохозяйственных преобразований, динамике количественных и качественных показателей водопотребления во времени и пространстве, недостатке данных наблюдений за стоком в естественных условиях его формирования. Известно, что современные обобщения норм годового стока Украины в виде карт изолиний большей частью отображают пространственное распределение бытового (преобразованного хозяйственной деятельностью) стока [187,261].

В последние десятилетия решение проблемы расчета характеристик стока в результате воздействия человека на окружающую среду осложнилось наметившимися изменениями глобального климата, которые определяют не только изменение водного баланса территории, но и степень трансформации стока при проведении водохозяйственных мероприятий на водосборах. Если до 80-х годов прошлого столетия под понятием “антропогенные воздействия “ в гидрологии суши понимались мезомасштабные воздействия на сток, осуществляемые внутри водосборов, то в начале 3-го тысячелетия содержание этого понятия расширилось, включив в себя изменения климата в результате глобального потепления [4,178,182,272,274]. Изменения климатических характеристик, обусловленные глобальным потеплением в результате увеличения концентрации парниковых газов, неизбежно повлекут за собой перераспределение водных ресурсов как во времени, так и в пространстве, оказывая влияние на планету в целом и на отдельные её регионы [24,53,298,299,300.]. Помимо самих водных ресурсов [265,266] претерпят также изменения составляющие водохозяйственных балансов [56,215], что приведет к переоценке условий эксплуатации водохозяйственных систем. На территории Украины, где возможности водообеспечения за счет естественных водных ресурсов ограничены, и, как следствие, водосборы перегружены водохозяйственными комплексами (системы прудов и

водохранилищ, переброска стока, заборы воды на орошение за счет местных водных ресурсов, сброс отработанных вод и т.п.), количественная оценка влияния на сток глобального потепления приобретает особую значимость при решении проблем управления водными ресурсами Украины в будущем.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что требуется принципиально новый подход к идеологии исследований характеристик стока в условиях антропогенного влияния, которая должна рассматривать процесс формирования стока, в первую очередь, в связи с климатическими условиями, определяемыми атмосферными процессами макромасштаба, переходя, в дальнейшем, к процессам мезомасштаба, обусловленных влиянием естественных и искусственных (антропогенных) внутрибассейновых факторов подстилающей поверхности.

Поскольку влияние водохозяйственных преобразований на сток рек зависит не только от масштабов хозяйственного освоения территории (площади, отведенные под орошение; площади, занимаемые водной поверхностью при НПУ и т.д.), но и от климатических условий, в моделировании бытового (нарушенного хозяйственной деятельностью) стока значительное место должны занимать расчеты стоковых характеристик на основе метеорологической информации, что позволит учитывать изменения стока при дальнейших значимых изменениях климата. В то же время сочетание климатических и связанных с ними водохозяйственных факторов может быть учтено только в вероятностном аспекте, в связи с чем нами было применено детерминированно-стохастическое моделирование.

Объектом исследования данной работы являются ресурсы поверхностных вод Украины, предметом исследования – годовой сток, который может быть рассмотрен в качестве интегрального показателя водных ресурсов.

В работе изложены основные принципы расчетов характеристик годового стока рек Украины в их естественном и нарушенном хозяйственной деятельностью состоянии, а также при возможных изменениях климата.

В качестве основных факторов водохозяйственных преобразований рассмотрены:

в зоне недостаточного увлажнения – потери на дополнительное испарение с водной поверхности искусственных водоемов, заборы воды на орошение из местного стока, возвратные воды с массивов, орошаемых за счет рек-доноров;

в зоне избыточного увлажнения – осушение болот и заболоченных земель.

Для исследования взаимосвязей годового стока с климатическими факторами и факторами подстилающей поверхности привлечены данные

по актинометрическим станциям (около 20), метеорологическим станциям (более 900) и гидрологическим постам (более 500 рядов годового стока).

Представлено решение следующих задач гидрологических расчетов:

- обоснование принципов моделирования бытового стока, учитывающего антропогенные преобразования макро и мезомасштаба;
- установление пространственно-временных закономерностей распределения естественного годового стока с точки зрения их обусловленности крупномасштабными атмосферными процессами и факторами подстилающей поверхности;
- теоретическое обоснование и реализация метода определения характеристик естественного годового стока на основе балансовых соотношений, с использованием метеорологической информации;
- установление закономерностей влияния основных видов водохозяйственных мероприятий, осуществляемых в пределах водосборов, на характеристики естественного годового стока;
- теоретическое обоснование и разработка метода определения характеристик годового стока при наличии водохозяйственных преобразований на водосборах, а также в условиях изменения климата.

РАЗДЕЛ 1

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ УКРАИНЫ

1.1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАСЧЕТНОГО БАЛАНСОВОГО СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ГОДОВОГО СТОКА ПО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Основные исследования возможностей применения уравнений водного и теплового балансов к расчетам стока относятся к первой половине прошедшего столетия [8,33,34,45,76,45,231]. Начиная с 70-х годов, интерес к оценке стока на основе балансовых соотношений был утрачен, поскольку точность определения стока по ним уступала точности расчета по уже накопленным к тому времени данным наблюдений за стоком [249]. В настоящее время в связи с нарушением стационарности процессов стока в результате воздействия водохозяйственных мероприятий, а также в связи с проявлениями изменений глобального климата в последние десятилетия проблема оценки стока по метеорологическим данным вновь приобрела актуальность.

Структура водного баланса участка суши тесно связана с его тепловым балансом, т.е. с поступлением и преобразованием деятельной поверхностью и деятельным слоем почвы тепла солнечной радиации. Связь между составляющими теплового и водного балансов и оценка роли климатических факторов в формировании стока рек была описана в начале века в работах таких авторов как Э.М. Ольдекоп (1911), Шрейбер (1904), М. А. Великанов (1928). В этих работах особое внимание уделяется определению общей составляющей уравнений водного и теплового балансов - испарению. В виде различного рода эмпирических соотношений (чаще всего с применением гиперболического тангенса) описана зависимость среднегодовых величин испарения от соотношения ресурсов тепла и влаги. При этом ресурсы влаги представлены нормой годовых осадков \bar{X} , а ресурсы тепла - максимально возможным испарением \bar{E}_0 , которое рассматривается как верхний предел испарения. Подробно исследован процесс испарения в различных географических зонах. Отмечено, что процесс испарения в зоне недостаточно увлажнения при высокой испаряющей способности ограничен “снизу” -

увлажненностью подстилающей поверхности. В зонах избыточного и достаточного увлажнения процесс испарения ограничен сверху - теплоэнергетическими ресурсами климата. Проблема состояла в правильной оценке предела испарения \bar{E}_0 . Огромное значение при её решении имели работы М.И. Будыко [33-35], в которых количественные характеристики теплоэнергетических ресурсов климата связывались с притоком тепла к земной поверхности - радиационным балансом земной поверхности

$$E_0 = \frac{R}{L}, \quad (1.1)$$

где E_0 - максимально возможное испарение;
 R - радиационный баланс земной поверхности;
 L - скрытая теплота испарения.

В дальнейшем в связи с недостатком массовых данных измерений радиационного баланса R измеренный радиационный баланс естественной поверхности был заменен величиной R_0 , которую называют “радиационным балансом увлажненной поверхности”. Величина R_0 определялась расчетным путем при условии, что температура испаряющей увлажненной поверхности равна температуре воздуха, измеренной над этой поверхностью. Для практического применения М.И. Будыко разработал специальную номограмму [184], в которой исходными данными для расчета испарения с поверхности суши являются годовая норма осадков \bar{X} и средняя многолетняя годовая величина радиационного баланса для увлажненной поверхности R_0 . При этом понятие максимально возможного испарения потеряло свою однозначность, поскольку представления об “увлажненной поверхности” вносило элемент субъективизма. Например, по А.Р. Константинову [110] под E_0 понимается “испарение при неограниченных влагозапасах испаряющей поверхности”, причем в качестве такой поверхности принимается “испарение с луга при сомкнутом травостое” и оптимальных почвенных влагозапасах. Н.А. Багров [8] рассматривал максимально возможное испарение как “испарение с водной поверхности при том же комплексе метеоусловий, что и над сушей”. Впоследствии В.С. Мезенцев [159] предложил новый подход к оценке теплоэнергетического эквивалента, разделив приходные и расходные составляющие уравнения теплового баланса подстилающей поверхности. Уравнение теплового баланса в общем виде записывается следующим образом [160]

$$R = LE + P + \Delta B - LC, \quad (1.2)$$

где R - радиационный баланс подстилающей поверхности;

L - скрытая теплота парообразования;

P - турбулентный теплообмен почвы с атмосферой;

ΔB - теплообмен с нижележащими слоями почвы;

LE - затрата тепла на испарение E , состоящее из транспирации E_T и испарения с почвы E_{II} , затененной растениями;

LC - тепло конденсации водяных паров воздуха на элементах земной поверхности.

Процесс теплообмена в любой точке пространства и за любой промежуток времени можно представить в виде статей прихода и расхода энергии более подробно, разложив отдельные слагаемые уравнения (1.2) на составляющие

$$R^+ + P^+ + B_1 - B_2 = LE + P^- + I_H - LC, \quad (1.3)$$

где R^+ - положительная (приходная) часть радиационного баланса;

P^+ - положительная (направленная к земной поверхности) составляющая турбулентного теплообмена;

$B_1 - B_2$ - изменение запасов тепла в деятельном слое почво-грунта (теплообмен в почве ΔB);

LE - затраты тепла на испарение;

P^- - расход тепла на нагревание воздуха (отрицательная часть турбулентного теплообмена);

I_H - длинноволновое излучение земной поверхности в ночные часы суток;

LC - тепло конденсации водяных паров воздуха на элементах земной поверхности, которое обычно не учитывается ввиду его незначимости по сравнению с другими составляющими.

Левая часть уравнения (1.3) рассматривается как предельные ресурсы энергии, обеспечивающие процесс испарения в определенных климатических условиях и названные “теплоэнергетическими ресурсами климата”

$$LE_m = R^+ + P^+ + (B_1 - B_2), \quad (1.4)$$

где E_m - величина, которая по своей смысловой нагрузке близка к величине E_0 , используемой в формулах предшествующих авторов, но имеет и свои особенности, заключающиеся в привлечении к расчету только положительных составляющих теплового баланса. Другими словами, E_m -

слой воды, который мог бы испариться с поверхности суши, если бы на процесс испарения были затрачены теплоэнергетические ресурсы климата (только приходная часть теплового баланса). В связи с этим величине E_m дано название “эквивалента теплоэнергетических ресурсов”. Величина E_m , выраженная в единицах слоя воды, конкретизирует понятие максимально возможного испарения, не прибегая к введению в него вида и степени увлажнения подстилающей поверхности. Таким образом, максимально возможное испарение E_m в интерпретации В.С. Мезенцева (1969) является исключительно климатической характеристикой.

Правая или расходная часть уравнения теплового баланса (1.3) обозначается как “суммарный теплообмен” T , обусловленный нагреванием приземного воздуха за счет турбулентного обмена и ночным эффективным излучением земной поверхности (без противоизлучения атмосферы). Тогда (1.3) можно представить в виде

$$LE_m = LE + T \quad (1.5)$$

Теоретическими пределами изменения составляющих уравнения (1.5) являются

$$LE_m \geq LE \geq 0 \quad (1.6)$$

$$LE_m \geq T \geq 0 \quad (1.7)$$

Иными словами, затраты тепла на фактическое испарение и суммарный теплообмен всегда меньше теплоэнергетических ресурсов климата, потому что в природе всегда наблюдается расход тепла.

Разделение составляющих теплового баланса на положительные и отрицательные отражает реальный физический процесс испарения, происходящий в природе. Именно приток коротковолновой радиации R^+ , являющийся разностью поглощенной радиации и дневного длинноволнового (эффективного) излучения, обуславливает нагревание деятельного слоя почвы (вместе с растительным покровом) и формирует над земной поверхностью гигрометрическую и термическую напряженность - испаряющую способность воздуха. Вместе с адвективным теплом P^+ величина R^+ (за минусом изменения теплоты в почве ΔB) составляет энергетические ресурсы процесса суммарного испарения [159].

Следующей проблемой гидрологических расчетов, помимо оценки величины максимально возможного испарения, явилось теоретическое обоснование вида уравнений водно-теплового баланса, связующим элементом которых является испарение с поверхности суши. В этом направлении выделяются работы Н.А. Багрова Н. А. (1953), Тюрка (1958),

М.А. Великанова (1928) и Д.Л. Соколовского (1928,1968). Значительный интерес в плане развития теории водно-теплового баланса представляет дифференциальное уравнение М.А. Великанова [45,46], полученное методом дифференцирования уравнения водного баланса за многолетний период по норме осадков

$$\frac{\partial \bar{Y}}{\partial \bar{X}} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial \bar{X}} = 1, \quad (1.8)$$

где \bar{Y} - сток;

\bar{X} - осадки;

\bar{E} - испарение.

На основе (1.8) получены следующие уравнения для расчета норм испарения и стока в точке, соответствующей положению метеорологической станции или центру тяжести водосбора

$$\bar{E} = a\bar{X} - b; \quad (1.9)$$

$$\bar{Y} = (1 - a)\bar{X} + b, \quad (1.10)$$

где a и $1 - a$ - тангенсы углов наклона этих зависимостей,

b - постоянная интегрирования или отрезки, отсекаемые на осях E и Y при $\bar{X} = 0$.

Согласно (1.8) тангенсы углов наклона (производные) дополняют друг друга до единицы, откуда и получены теоретические пределы углов наклона - от 0° до 45° .

Подход, предложенный М.А. Великановым, получил своё дальнейшее развитие в методе В.С. Мезенцева (1969), который в уравнение водного баланса ввел новую составляющую, являющуюся частью уравнения теплового баланса подстилающей поверхности и характеризующую теплоэнергетические ресурсы климата. Уравнение водного баланса представлено В.С. Мезенцевым в следующем виде

$$H = E + Y, \quad (1.11)$$

где H - характеристика увлажнения;

E - испарение с поверхности суши;

Y - сток.

Под характеристикой увлажнения H понимаются выпадающие за расчетный период осадки X , изменения запасов влаги в почве $w_1 - w_2$ и водоносных горизонтах $Y_{ГР1} - Y_{ГР2}$

$$H = X + w_1 - w_2 + Y_{ГР1} - Y_{ГР2} \quad (1.12)$$

Ввод характеристики теплоэнергетических ресурсов достигается делением левой и правой частей уравнения (1.11) на величину E_m

$$\frac{H}{E_m} = \frac{E}{E_m} + \frac{Y}{E_m} \quad (1.13)$$

При этом вводятся безразмерные коэффициенты

$$\beta_X = \frac{X}{E_m}; \beta_E = \frac{E}{E_m}; \beta_Y = \frac{Y}{E_m}; \psi = \frac{T}{LE_m}; \eta = \frac{Y}{X} \quad (1.14)$$

С учетом (1.13) уравнение водного баланса (1.11) представляется в виде

$$\beta_H = \beta_E + \beta_Y, \quad (1.15)$$

откуда

$$\beta_E = \beta_H - \beta_Y \quad (1.16)$$

или

$$\beta_E = (1 - \eta)\beta_H \quad (1.17)$$

При этом уравнение теплового баланса (1.5) было преобразовано к виду

$$\beta_E = 1 - \psi \quad (1.18)$$

Уравнения (1.17) и (1.18) удовлетворяют следующим теоретическим граничным условиям

$$\beta_E \rightarrow 0 \text{ при } \psi \rightarrow 1; \eta \rightarrow 0 \text{ и } \beta_H \rightarrow 0, \quad (1.19)$$

$$\beta_E \rightarrow 1 \text{ при } \psi \rightarrow 0; \eta \rightarrow 1 \text{ и } \beta_H \rightarrow \infty, \quad (1.20)$$

Объединив (1.17) и (1.18), В.С.Мезенцев получил уравнение водно-теплового баланса вида, которое теоретически строго обоснованно,

$$\beta_H = \frac{1 - \psi}{1 - \eta}, \quad (1.21)$$

где ψ - коэффициент теплового стока (коэффициент расхода тепла на турбулентный теплообмен и ночное длинноволновое излучение);

η - коэффициент стока воды.

В связи с тем, что значения коэффициентов стока воды и коэффициентов стока тепла за отдельные внутригодовые промежутки времени неизвестны, уравнение (1.21) трудно применить для практических расчетов. Поэтому В.С. Мезенцев прибегнул к получению частных форм уравнения связи балансовых элементов, которые удовлетворяли бы граничным условиям (1.19), (1.20), что и было достигнуто путем дифференцирования (1.15) по величине отношения ресурсов влаги и тепла β_H

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} + \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = 1 \quad (1.22)$$

Рассматривая первые частные производные как тангенсы углов наклона касательных к оси β_H , которые дополняют друг друга до единицы, В.С.Мезенцев сделал следующие выводы о теоретических пределах изменения составляющих уравнения (1.22):

если

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} = \operatorname{tg} \varphi_1 = 0 \text{ и } \varphi_1 = 0^\circ, \text{ то } \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = \operatorname{tg} \varphi_2 = 1 \text{ и } \varphi_2 = 45^\circ, \quad (1.23)$$

если

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} = \operatorname{tg} \varphi_1 = 1 \text{ и } \varphi_1 = 45^\circ, \text{ то } \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = \operatorname{tg} \varphi_2 = 0 \text{ и } \varphi_2 = 0^\circ \quad (1.24)$$

Далее используется аппроксимирование, т.е. приближенное аналитическое выражение обнаруженных закономерностей. При этом задается некоторая функция F , которая, во-первых, удовлетворяет полученным теоретическим пределам, а, во-вторых, отражает естественные процессы формирования водных ресурсов, а также ресурсов увлажнения и тепла. Если принять

$F = \frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H}$, когда F представляет собой приращение испарения при

изменении ресурсов увлажнения, то можно воспользоваться существованием зависимости интенсивности испарения от недостатка насыщения воздуха влагой. Величину $\beta_E = E / E_m$ можно уподобить относительной влажности воздуха, тогда разность $1 - E / E_m$ можно рассматривать как характеристику относительного недостатка насыщения. “Однако в природных условиях часть испарившейся влаги обычно

выносятся за пределы рассматриваемого участка суши вместе с непрерывно движущимися воздушными массами. По этой причине действительный недостаток насыщения за более или менее длительные расчетные промежутки времени обычно больше указанной разности” [176] и приращение испарения в зависимости от общего увлажнения территории аппроксимируется функцией вида

$$F = \frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} = (1 - \beta_E^n)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (1.25)$$

где n - параметр, интегрирующий влияние физико- географических условий формирования стока.

После интегрирования выражения (1.25) частное уравнение связи между составляющими водного и теплового балансов представлено следующим образом

$$\beta_E = (1 + \beta_H^{-n})^{-\frac{1}{n}} \quad (1.26)$$

или с учетом обозначений (1.14)

$$E = E_m \left[1 + \left(\frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (1.27)$$

Нетрудно заметить, что в формулах (1.25, 1.26, 1.27) используются предложенные ранее подходы к описанию процесса испарения как функции соотношения E/E_0 , рассматриваемого в качестве показателя влажности воздуха. Иллюстрацией такого подхода является формула Н.А.Багрова [8], который представил следующее соотношение между общим увлажнением территории и приращением испарения

$$\Delta E = \left[1 - \left(\frac{E}{E_0} \right)^n \right] \Delta H, \quad (1.28)$$

где ΔH - увеличение увлажнения с выпадением осадков;

E - испарение;

E_0 - испаряемость;

ΔE - приращение испарения за счет увеличения увлажнения;
 n - параметр, характеризующий ландшафтно-зональные условия (уклоны местности, заболоченность, лесистость, водонепроницаемость почвы и т.д.).

Близка по структуре к (1.27) формула Л. Тюрка [231], полученная на основе анализа составляющих водного баланса для многих водосборов территорий Азии, Африки, Северной Америки

$$E = X \left[A + (X / E_0)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (1.29)$$

где A - константа; а значение параметра n принимается равным 2.

Однако метод В.С. Мезенцева представляется наиболее обоснованным, так как ни Л. Тюрком, ни Н.А. Багровым не были до конца исследованы физические сущности параметров, входящих в расчетные формулы. Преимущество метода В.С. Мезенцева состоит в том, что он дал четкое физическое обоснование всем компонентам водно - теплового баланса. Недостатком же является отступление от строго обоснованного теоретически уравнения (1.22), которое можно представить в виде

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} = 1 - \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H}, \quad (1.30)$$

где $\frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = \text{tg}(\beta_Y, \beta_H^\Lambda)$, к аппроксимирующей степенной функции

$$\frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} = (1 - \beta_E^n)^{\frac{n+1}{n}}. \quad (1.31)$$

Выраженное через F (1.25) значение $\frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H}$ примет вид

$$\frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = 1 - \frac{\partial \beta_E}{\partial \beta_H} \quad (1.32)$$

или

$$\frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = 1 - (1 - \beta_E^n)^{\frac{n+1}{n}} \quad (1.33)$$

Полученная зависимость (1.33) отображает основные закономерности (1.32) в смысле предельных значений

$$\text{при } \beta_E \rightarrow 0, \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} \rightarrow 0; \text{ при } \beta_E \rightarrow 1, \frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} \rightarrow 0, \quad (1.34)$$

однако градиент степенной функции уже существенно зависит от параметра n . Хотя предельные значения (1.32) и (1.33) совпадают, внутри этого диапазона можно идти или по тангенсоиде или по параболе n -ого порядка. В этом и состоит некорректность перехода от (1.32) к (1.33). Таким образом, предложенная В.С. Мезенцевым аппроксимация, приводит к полуэмпирическому решению, имеющему концептуальный характер.

Физическое содержание параметра n устанавливается следующим образом. Среди множества значений β_H , изменяющихся в пределах от 0 до ∞ , существует $\beta_H = 1,0$, т.е. равенство ресурсов увлажнения и теплоэнергетических ресурсов. Подстановка условия $H = E_m$ в (1.26) и использование уравнения водного баланса позволяют получить

$$n = \frac{-0,301}{\lg(1 - \eta_0)}, \quad (1.35)$$

где η_0 - коэффициент стока в условиях равенства влаги и тепла.

В соответствии с уравнением (1.26) предоставляется возможность вместо (1.33) записать

$$\frac{\partial \beta_Y}{\partial \beta_H} = 1 - (1 + \beta_E^n)^{-\frac{n+1}{n}} \quad (1.36)$$

Уравнение (1.35) после интегрирования примет вид

$$\beta_Y = \beta_H - (1 + \beta_H^{-n})^{-\frac{1}{n}} \quad (1.37)$$

С учетом обозначений (1.14) полное уравнение водного баланса (1.11) записывается следующим образом

$$H = Y + E_m \left[1 + \left(\frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (1.38)$$

Уравнение (1.38) содержит составляющую, входящую в тепловой баланс земной поверхности, - испарение с поверхности суши E (1.27), в связи с чем выражение (1.38) называют уравнением водно-теплового баланса.

Уравнение водно-теплового баланса, выраженное относительно величины стока имеет вид

$$Y = H - E_m \left[1 + \left(\frac{H}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (1.39)$$

При глубоком залегании грунтовых вод (что характерно для степной и пустынной зон), уравнения (1.12) и (1.39) преобразуются к виду

$$H = X + w_1 - w_2 \quad (1.40)$$

$$Y = X + w_1 - w_2 - E_m \left[1 + \left(\frac{X + w_1 - w_2}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (1.41)$$

В случае несовпадения поверхностного и подземного водосборов может возникнуть дополнительный приток (в области разгрузки карста) или отток (в области питания карста) грунтовых вод, который должен быть учтен в уравнении водного баланса составляющей ($Y_{Г1} - Y_{Г2} = \Delta Y_{ГР}$).

Разность $w_1 - w_2$, представляющая изменение влагосодержания расчетного почвенного слоя, принимает существенные положительные и отрицательные значения во внутригодовые периоды (месяцы, декады) и в отдельные годы (группы лет). В среднем же, для многолетнего периода выполняется условие

$$w_1 - w_2 = 0, \quad (1.42)$$

в связи с чем балансовое соотношение (1.41), выраженное относительно величин годового стока, имеет вид

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{E}_m \left[1 + \left(\frac{\bar{X}}{\bar{E}_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (1.43)$$

где \bar{Y} , \bar{X} , \bar{E}_m - среднемноголетние величины (нормы) годового стока, осадков и теплоэнергетического эквивалента, соответственно;

n - параметр, интегрирующий влияние физико- географических условий формирования стока.

Как уже отмечалось, значение параметра n должно подбираться таким образом, чтобы приблизить степенную аппроксимирующую функцию к тангсоиде. Результаты исследований показали [159,160,191], что при расчетах норм годового стока для равнинных территорий можно использовать $n = 3,0$.

Норма стока, рассчитанная по (1.43) определяется климатическими факторами - нормой годовых осадков и максимально возможного испарения, которые подчиняются закону географической зональности и могут быть картированы. Следовательно, рассчитанные при постоянном n величины стока зависят от соотношения ресурсов тепла \bar{E}_m и влаги \bar{X} и отражают их взаимодействие. Норма годового стока, вычисленная по балансовым соотношениям, включающим в себя только характеристики климата, носит название нормы климатического стока и в дальнейшем будет обозначаться как \bar{Y}_K .

1.2. ОЦЕНКА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КЛИМАТА

Величина LE_m , представленная уравнением (1.3), определяет предельные, максимально возможные энергетические ресурсы климата, а слой максимально возможного испарения E_m рассматривается как теплоэнергетический эквивалент, позволяющий оценивать эти ресурсы по следующему уравнению [159,160]

$$E_m = \frac{R^+ + P^+ + (B_1 - B_2)}{L} \quad (1.44)$$

Наибольшие трудности при расчетах по (1.44) вызывает определение величины $B_1 - B_2$ - изменение запасов тепла в деятельном слое почвы. Однако, в целом за год и тем более за многолетний период выполняется условие $B_1 - B_2 = 0$, откуда

$$\bar{E}_m = \frac{\bar{R}^+ + \bar{P}^+}{L}, \quad (1.45)$$

где \bar{E}_m - норма (среднегодовая величина) максимально возможного испарения;

\bar{R}^+, \bar{P}^+ - нормы положительных составляющих уравнения теплового баланса подстилающей поверхности.

Данные о годовых составляющих радиационного баланса содержатся в материалах наблюдений актинометрических станций. Положительная составляющая радиационного баланса определяется как разность между коротковолновой частью радиационного баланса подстилающей поверхности и ее длинноволновым излучением [186]. Что касается положительной (направленной к земной поверхности) составляющей турбулентного теплообмена P^+ , то его величина составляет лишь около 20% от годичной суммы расчетного турбулентного теплообмена в дневное время, когда поток тепла направлен вверх от поверхности и не превышает 10-15% от годового радиационного баланса. В.С. Мезенцевым [191] предложена эмпирическая формула для расчета годовой величины P^+

$$P^+ = 28,5 - 0,082R, \text{кДж} / \text{см}^2, \quad (1.46)$$

где R - величина годового радиационного баланса.

Таким образом, при $R = 0$ годовая величина P^+ составляет $28,5 \text{кДж} / \text{см}^2$, а при $R < 0$, положительная составляющая турбулентного теплообмена будет расти. В пределах Украины положительная составляющая турбулентного теплообмена меняется незначительно - от $12,4$ до $16,7 \text{кДж} / \text{см}^2$ в год. В работе [204] отмечается, что на большей части Украины и Молдовы турбулентный поток тепла направлен от подстилающей поверхности в атмосферу, т.е. величины P^+ невелики по отношению к годовым нормам турбулентного теплообмена, которые изменяются в пределах исследуемой территории от $25,1 \text{кДж} / \text{см}^2$ до $83,6 \text{кДж} / \text{см}^2$. Наименьшие значения положительной составляющей турбулентного теплообмена наблюдаются на юге (актинометрические станции Одесса, Херсон, Аскания Нова), наибольшие - на севере.

Число актинометрических станций (менее 20 в пределах Украины) ограничено и недостаточно для детального описания пространственного распределения теплоэнергетических ресурсов климата. Поскольку

температурный режим Украины в значительной степени обусловлен поступлением солнечной радиации к земной поверхности, для расчетов по данным метеорологических станций Е.Д. Гопченко и Н.С. Лободой [69] была получена региональная зависимость величин \bar{E}_m от температурных характеристик летнего периода, когда преобладает антициклональная погода с малой облачностью и слабыми ветрами [40,103]

$$\bar{E}_m = 13,3 \sum_V^{IX} T_M - 307, \quad (1.47)$$

где $\sum_V^{IX} T_M$ - сумма норм среднемесячных температур воздуха за летний период (с мая по сентябрь, включительно). Коэффициент полученного уравнения линейной парной регрессии равен $0,94 \pm 0,01$.

На основе этого уравнения были рассчитаны и картированы значения норм максимально возможного испарения для всей территории Украины [69]. Построение карты изолиний выполнено на топографической основе 1: 500000 по данным более 300 метеорологических станций Украины и Молдовы.

Пространственное изменение максимально возможного испарения на равнинной части Украины подчиняется закону широтной географической зональности (рис.1.1). Наименьший градиент изменения величины \bar{E}_m наблюдается на северо-западе Полесской низменности. Теплоэнергетические ресурсы климата возрастают от 750 мм на юго-западе до 1000 мм на юге и юго-востоке по мере перехода из северной климатической области, охватывающей Полесье и лесостепь, в южную, совпадающую со степной зоной Украины. Пространственное обобщение норм максимально возможного испарения как количественного показателя теплоэнергетических ресурсов климата выполнено для равнинной территории Украины впервые.

В горных районах проявляется вертикальная зональность климата: по мере увеличения высоты местности над уровнем моря происходит рост количества выпадающих осадков и снижение температур воздуха.

Для горной части Крымского полуострова получены эмпирические зависимости $\bar{E}_m = f(H)$, отражающие вертикальную зональность в распределении изучаемой характеристики [144]. Изменение норм теплоэнергетического эквивалента Горного Крыма с высотой местности может быть представлено следующим уравнением линейной парной регрессии, полученным по данным 35 метеорологических станций

$$\bar{E}_m = 991 - 0.418(H - 100) , r = 0.860 \quad (1.48)$$

где r - коэффициент линейной парной корреляции; H - высота положения метеорологической станции.

Качество расчетов может быть повышено, если из всех данных выделить те, которые относятся к территории западной части южного побережья (13 метеорологических станций). Расчетные зависимости при этом принимают следующий вид (рис.1.2)

-для западной части южного побережья

$$\bar{E}_m = 1058 - 0,460(H - 100) , r = 0.976 \quad (1.49)$$

- для остальной части Горного Крыма

$$\bar{E}_m = 951 - 0,387(H - 100) , r = 0.921 \quad (1.50)$$

Различия в значениях максимально возможного испарения при высоте 100м над уровнем моря обусловлены тем, что узкая прибрежная полоса западной части южного побережья защищена от вторжений холодного воздуха с севера и северо-востока Крымскими горами.

Аналогичная ситуация отмечена в области Карпатских гор [146], где изменение норм максимально возможного испарения с ростом высоты местности представлено в виде порайонных зависимостей $\bar{E}_m = f(H)$:

- для горной части рр.Днестр и Прут, подверженных влиянию вторжений холодных воздушных масс с севера

$$\bar{E}_m = 786 - 0,427(H - 200), r = 0,914 , \quad (1.51)$$

- для водосбора р.Тисса

$$\bar{E}_m = 819 - 0,483(H - 200), r = 0.911 \quad (1.52)$$

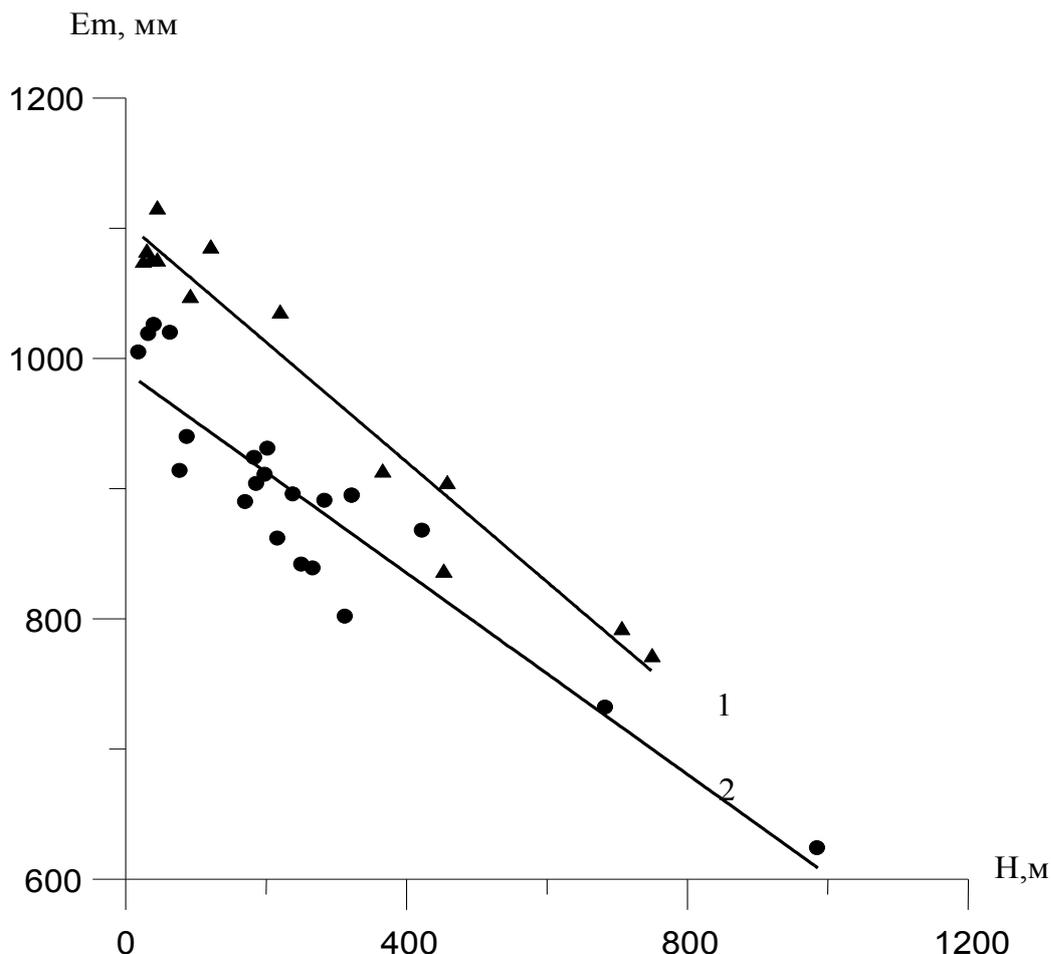


Рис. 1.2 Зависимость норм максимально возможного испарения от высоты местности H для Горного Крыма
 1 - юго-западное побережье до г. Алушта
 2 - остальная часть Горного Крыма

1.3. ОЦЕНКА РЕСУРСОВ УВЛАЖНЕНИЯ

Эквивалентом ресурсов увлажнения является норма годовых осадков. Для характеристики распределения осадков в пределах юга Украины и Молдовы использованы данные более, чем по 900 метеорологическим станциям и постам, приведенные в “Справочниках по климату СССР” [224,225]. К величинам среднемесячных осадков, содержащихся в фондовых материалах, согласно рекомендациям ГГИ [232], помимо поправок на смачивание осадкомерного ведра и ветровое выдувание, нами дополнительно была введена поправка, учитывающая потери на испарение из осадкомера. Корректировка данных осуществлялась по следующему выражению

$$\bar{X} = \bar{X}' + k_E \bar{X}_H, \quad (1.53)$$

где \bar{X} - месячная норма осадков с учетом всех систематических ошибок в показаниях осадкомера, мм;

\bar{X}' - месячная норма осадков с учетом поправок на смачивание осадкомерного ведра и ветровое выдувание, мм;

\bar{X}_H - месячная норма осадков, рассчитанная по данным наблюдений, мм;

k_E - поправочный коэффициент, отражающий потери месячных осадков на испарение [232].

По уточненным значениям годовых норм осадков построена карта изолиний на топографической основе 1: 500000 (рис.1.3). Атмосферные осадки распределены по территории Украины неравномерно. Основной закономерностью пространственного распределения осадков по равнинной территории Украины является уменьшение их количества с севера и северо-запада на юг и юго-восток - от 700 в Полесьи до 450 мм - в Степном Крыму и на участке черноморского побережья Херсонской области [69]. Такое распределение с нечетко выраженной широтной географической зональностью определяется западным переносом воздушных масс: воздух Атлантики трансформируется по мере продвижения из северо-западных областей в восточные и юго-восточные. Рельеф определяет региональные особенности циркуляции и вносит существенные изменения в поле осадков [102,103] горных регионов Украины. Так, в Крыму количество осадков в горах растет, приближаясь по норме к 1000 мм (рис.1.4). Еще более выразительно влияние рельефа проявляется в Карпатской провинции, где средняя многолетняя величина осадков превышает 1200 - 1300 мм. Распределение изолиний норм годовых осадков соответствует картам, приведенным в литературе [103,115]. Наибольшие значения годовых норм осадков ($\bar{X} > 700 \text{ мм}$) в пределах равнинной части Украины наблюдаются на севере, где согласно гидрологическому районированию расположены Полесская и Деснянская области гидрологической зоны избыточной водности [5]. В гидрологической зоне достаточной водности изменение норм годовых осадков наблюдается в интервале от 650 до 550мм, причем в Западной области этой зоны распределение изолиний близко к меридиональному. Норма годовых осадков менее 550 мм характерна для гидрологической зоны недостаточной водности, в пределах которой находится Причерноморская область. В Северско-Донецко-Днепровской области распределение изолиний имеет сложный рисунок, что обусловлено влиянием Донецкого Кряжа и Приазовской возвышенности.

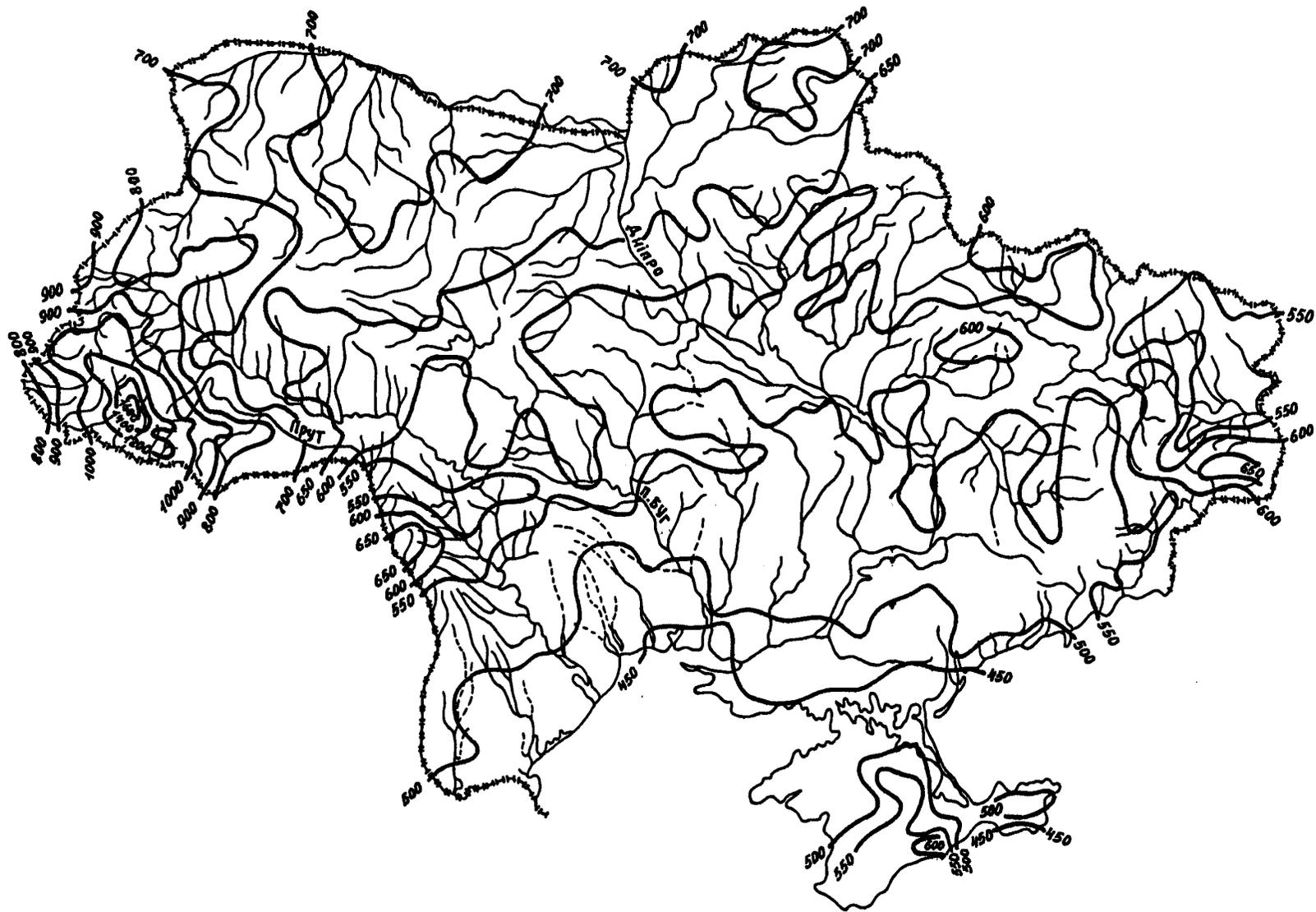


Рис. 1.3 Норма годовых осадков (мм)

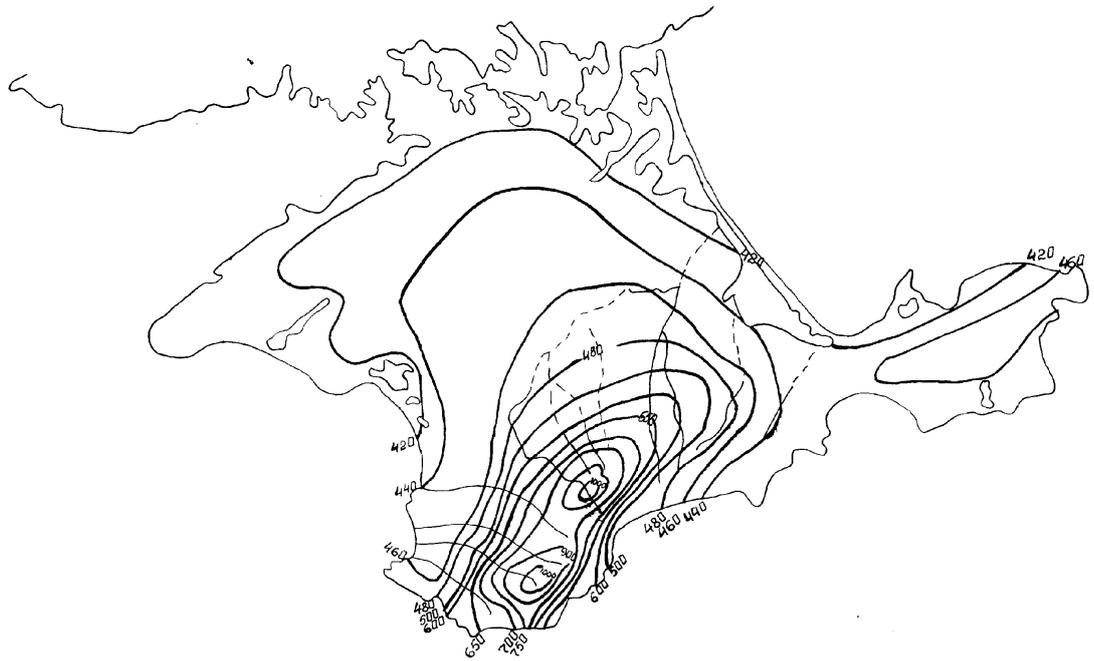


Рис. 1.4 Норма годовых осадков (Крымский полуостров), мм

1.4. ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ УКРАИНЫ ПО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Норма годового стока, рассчитанная по уравнению водно-теплового баланса (1.43) как функция соотношения ресурсов тепла и влаги, отражает влияние только климатических факторов, исключая при этом воздействие на сток факторов подстилающей поверхности (азональных и интразональных), в том числе и обусловленных водохозяйственными мероприятиями, осуществляемыми в пределах водосборов. Следовательно, величины норм климатического стока можно рассматривать как характеристику естественных (неизмененных хозяйственной деятельностью) водных ресурсов территории.

В отличие от норм годового стока, рассчитанных по данным измерений, нормы климатического стока являются точечными (относящимися к конкретной метеостанции) характеристиками. Для их практического применения необходимо построение карты изолиний, которое было выполнено по данным более 900 метеорологических станций и постов.

Карта изолиний норм климатического стока для равнинной территории представлена на рис. 1.5 и в целом соответствует тем картам, которые приведены в нормативных документах СНИП 2.01.14-83 и современной литературе [181,261]. Анализируя распределение норм климатического стока, можно прийти к следующим выводам.

Наибольшая водность рек Украины соответствует западным и северо-западным ее частям. В бассейне р.Припять и верховьях р. Западный Буг норма климатического стока составляет 160мм. В пределах правобережной Украины преобладает воздействие западного переноса воздушных масс: уменьшение стока наблюдается в направлении с северо-запада на юго-восток, в то время как сток центральных и восточных областей Украины определяется меридиональным характером атмосферных процессов и уменьшение стока происходит в направлении север - юг. Наименьшая водность соответствует Причерноморью и составляет 20мм. Широтная зональность распределения норм климатического годового стока нарушается на востоке влиянием Донецкого Кряжа, где нормы климатического стока возрастают до 60мм. В горных районах сток растет с высотой и достигает 1000мм (рис.1.6).

Как уже отмечалось, норма годового климатического стока, определяемая по карте изолиний, носит зональный характер, обусловленный климатическими факторами, и, следовательно, может быть отождествлена с естественным стоком. Подтверждение этого положения получено путем сравнения норм естественного и климатического годового стока рек Украины, имеющих площадь водосборов большей второй критической F_{2KP} . Согласно А.Н. Бефани [16,17] такая площадь может рассматриваться в качестве критерия разделения водосборов по условиям грунтового питания, т.е. это площадь водосбора, при которой грунтовое питание стабилизируется и не зависит от площади водосбора. Величина F_{2KP} изменяется по территории в зависимости от общей увлажненности территории и гидрогеологических условий. Как правило, при стабильном грунтовом питании влияние большинства факторов подстилающей поверхности (закарстованность, неполное дренирование рекой водоносных горизонтов, залесенность, заболоченность и т.д.) на сток становится менее существенным.

В случае, когда сведения о стоке в его естественном состоянии отсутствовали, к анализу привлекались данные о восстановленном (приведенном к естественному виду) стоке, находящиеся в различных литературных и фондовых источниках [38,127,166,194,196,260].

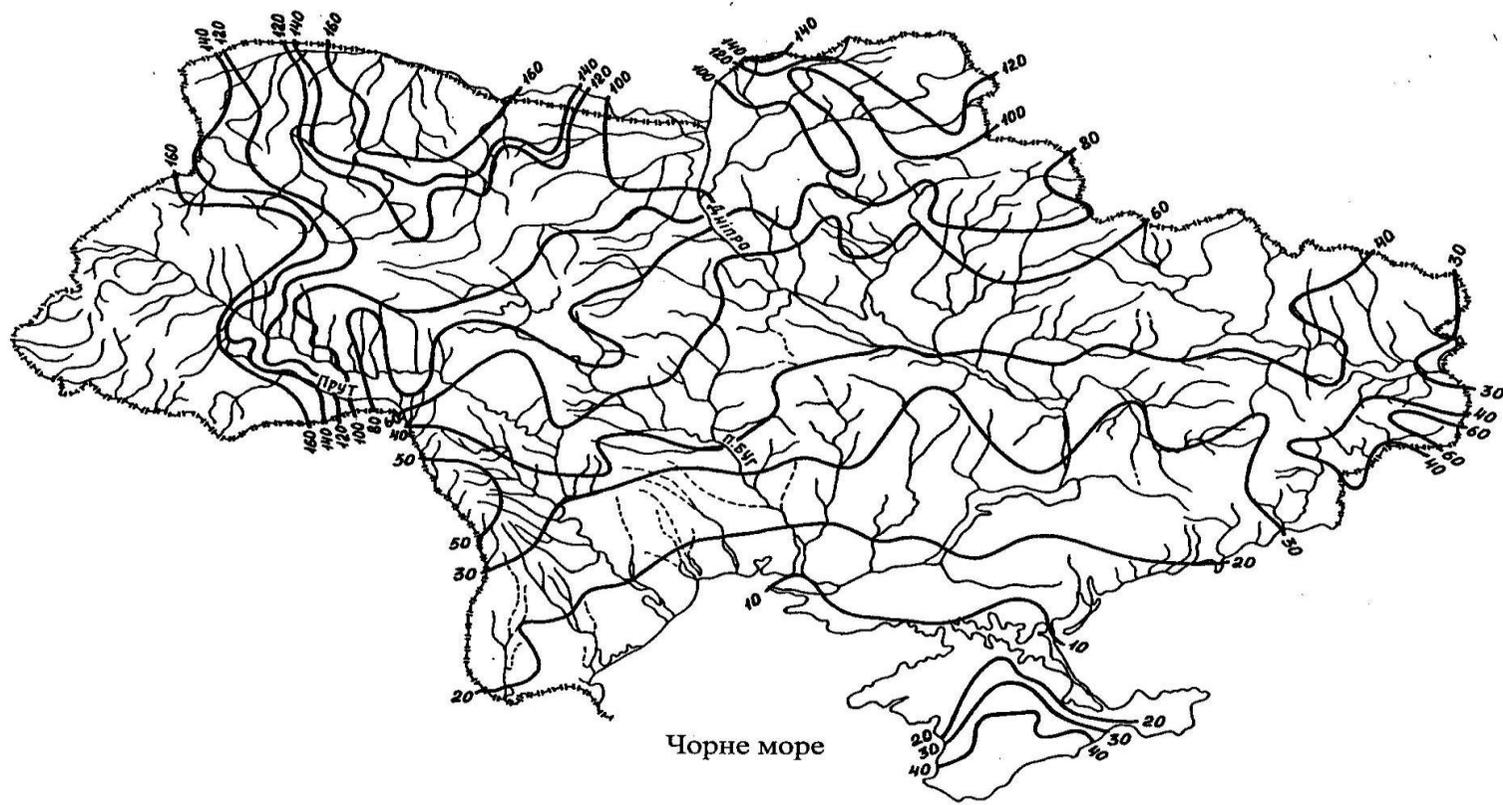


Рис. 1.5 Норма годового климатического стока (мм)

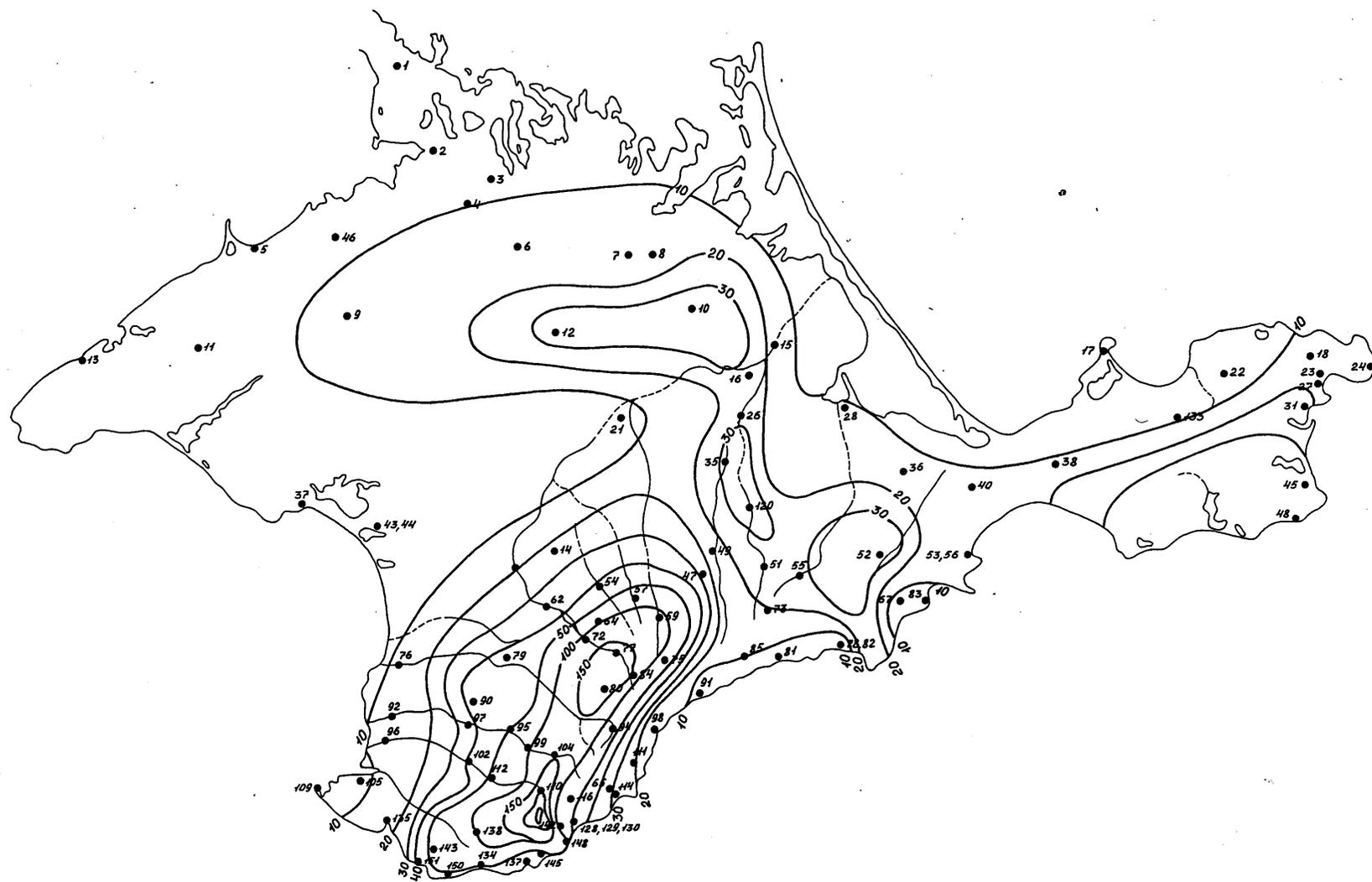


Рис. 1.6 Норма годового климатического стока (мм)
у точек – номера метеорологических постов

Сравнительный анализ норм естественного и климатического стока, выполненный для территории Молдовы, юго-западной Украины, среднего и нижнего течения р. Днестр, междуречий Дунай-Днестр и Днестр – Западный Буг, а также для водосборов западной части Украинского Полесья и бассейна р. Северский Донец, показал, что среднее относительное отклонение фактических и рассчитанных по уравнению водно-теплового баланса (1.43) значений не превышает 10%. В качестве примера можно привести сравнение норм климатического и естественного стока, выполненное для больших водосборов западной части Украинского Полесья и Подолья (рис. 1.7).

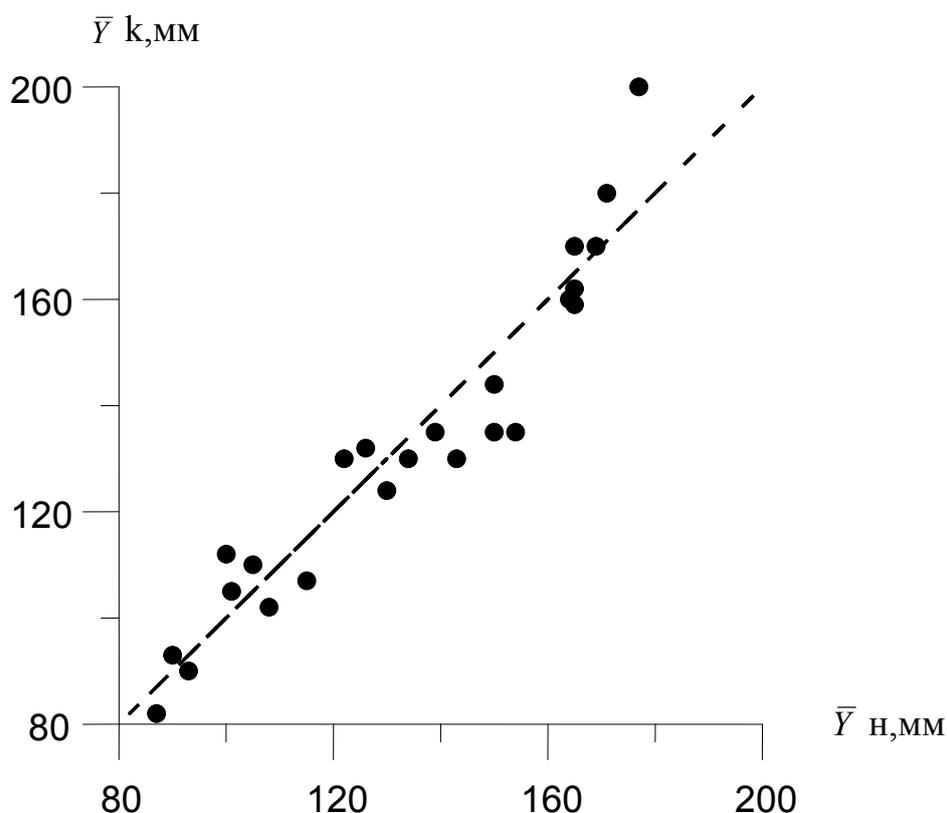


Рис.1.7 Сравнение норм годового климатического стока \bar{Y}_k со среднемноголетним стоком \bar{Y}_n северо-западная часть Украины
 - - - линия равных значений
 (данные сняты в узлах координатной сетки)

Построение карты норм климатического стока особенно важно для регионов южной Украины, где рек со стоком в естественных условиях его формирования практически не сохранилось, а начало стационарных наблюдений совпадает с интенсификацией водохозяйственных преобразований. В настоящее же время, как известно, в практике

гидрологических расчетов используется карта изолиний речного стока, рекомендованная нормативным документом СНиП 2.01.14 - 83, на которой изолинии на территории Причерноморья и степного Крыма проведены пунктиром [181].

1.5. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДИК РАСЧЕТА НОРМ ЕСТЕСТВЕННОГО ГОДОВОГО СТОКА В ГОРНЫХ РЕГИОНАХ НА ОСНОВЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

При составлении расчетных методик для горных территорий обычно используются зависимости характеристик стока от главного физико-географического показателя, с которым связаны особенности формирования стока горных водосборов – высоты местности. Например, для Карпатских гор в СНиП 2.01.14-83 для определения норм годового стока неизученных рек выделено три района по характеру зависимости $\bar{q} = f(H)$. Границы выделенных районов являются условными. Точность расчета по ним неодинакова для разных водосборов, так как зависит от степени соответствия элементов водного баланса осредненным по высотным поясам значениям стока. Осадки с повышением высоты местности растут, а максимально возможное испарение убывает. Однако подобный характер изменения составляющих водно-теплового баланса является лишь схемой. В действительности их изменение происходит более сложно под влиянием форм рельефа, экспозиции склонов, распределения воздушных течений, подстилающей поверхности и пр. Нами предложен подход, позволяющий использовать порайонные зависимости составляющих водно-теплового баланса – осадков и максимально возможного испарения для расчета норм стока горных водосборов. При этом вначале разрабатываются и анализируются зависимости $\bar{E}_m = f(H)$ и $\bar{X} = f(H)$, затем на основе этих зависимостей и уравнения (1.43) выполняется расчет норм климатического стока с использованием на входе в модель данных о средней высоте водосбора H_{CP} . С целью обоснования возможности применения метода водно-теплового баланса к расчету норм естественного годового стока по метеорологическим данным в горных районах нами была выбрана достаточно хорошо изученная в гидрологическом отношении территория горной части бассейна р. Днестр, которая относится к Прикарпатскому гидрологическому району [194]. Для определения норм стока неизученных рек в СНиП 2.01.14-83 предложена зависимость величин годового стока от средней высоты водосборов, которую можно описать следующим уравнением линейной парной регрессии [181]

$$\bar{Y} = 0,914(H_{CP} - 200) + 95,8 \quad , \quad (1.54)$$

где \bar{Y} - норма годового стока (мм);
 H_{CP} - средняя высота водосбора (м).

По данным 72 метеорологических станций и постов была дана оценка теплоэнергетических ресурсов климата, характеризующихся теплоэнергетическим эквивалентом \bar{E}_m , и ресурсов увлажнения, представленных нормой годовых осадков \bar{X} в точках, соответствующих положению метеорологических станций [146]. Обе характеристики климата подчиняются закону вертикальной зональности

$$\bar{X} = 742 + 0,679(H - 200), r = 0,849 \quad ; \quad (1.55)$$

$$\bar{E}_m = 777 - 0,432(H - 200), r = 0,899 \quad , \quad (1.56)$$

где H - высота положения метеорологической станции.

На базе балансового выражения (1.43) выполнен расчет норм климатического стока с использованием расчетных данных, полученных при помощи (1.55) и (1.56), при этом в качестве аргумента H использовалась средняя высота водосбора H_{CP} . Полученная зависимость норм годового климатического стока с высотой полностью соответствует приведенной в СНИП 2.01.14 - 83 (рис.1.8).

Среднее относительное отклонение рассчитанных по зависимостям $\bar{Y} = f(H)$ и фактических (наблюденных) величин достаточно велико и составляет $\pm 9,0\%$. Наибольшее отклонение ($>30\%$) отмечается для водосбора р. Тысменица - г. Дрогобыч, что может быть объяснено деятельностью нефтеперерабатывающего завода [46]. В пользу данного предположения говорят следующие факты: ряд наблюдений на этом водосборе является статистически неоднородным, коэффициенты корреляции годового стока со стоком других водосборов занижены. Высокий по сравнению с другими водосборами коэффициент автокорреляции $r(1) = 0,56$ свидетельствует о наличии искусственной зарегулированности стока. Норма наблюдаемого стока с водосбора р.Стрый - г. Матков также значительно превышает норму климатического стока. Дело в том, что нижнее течение рек горной части Днестра находится в зоне Предкарпатской возвышенности, где междуречья поднимаются на 300 -500 м над уровнем моря, выше располагаются Внешние Карпаты (Бескиды, Горганы с наиболее высокими отметками земной поверхности), третью полосу составляют Водораздельно-Верховинские Карпаты, которые по высоте уступают Внешним Карпатам (800 - 1200 м) и, наконец, наиболее высокую часть Карпат составляет Полонинско-Черногорский хребет [115].

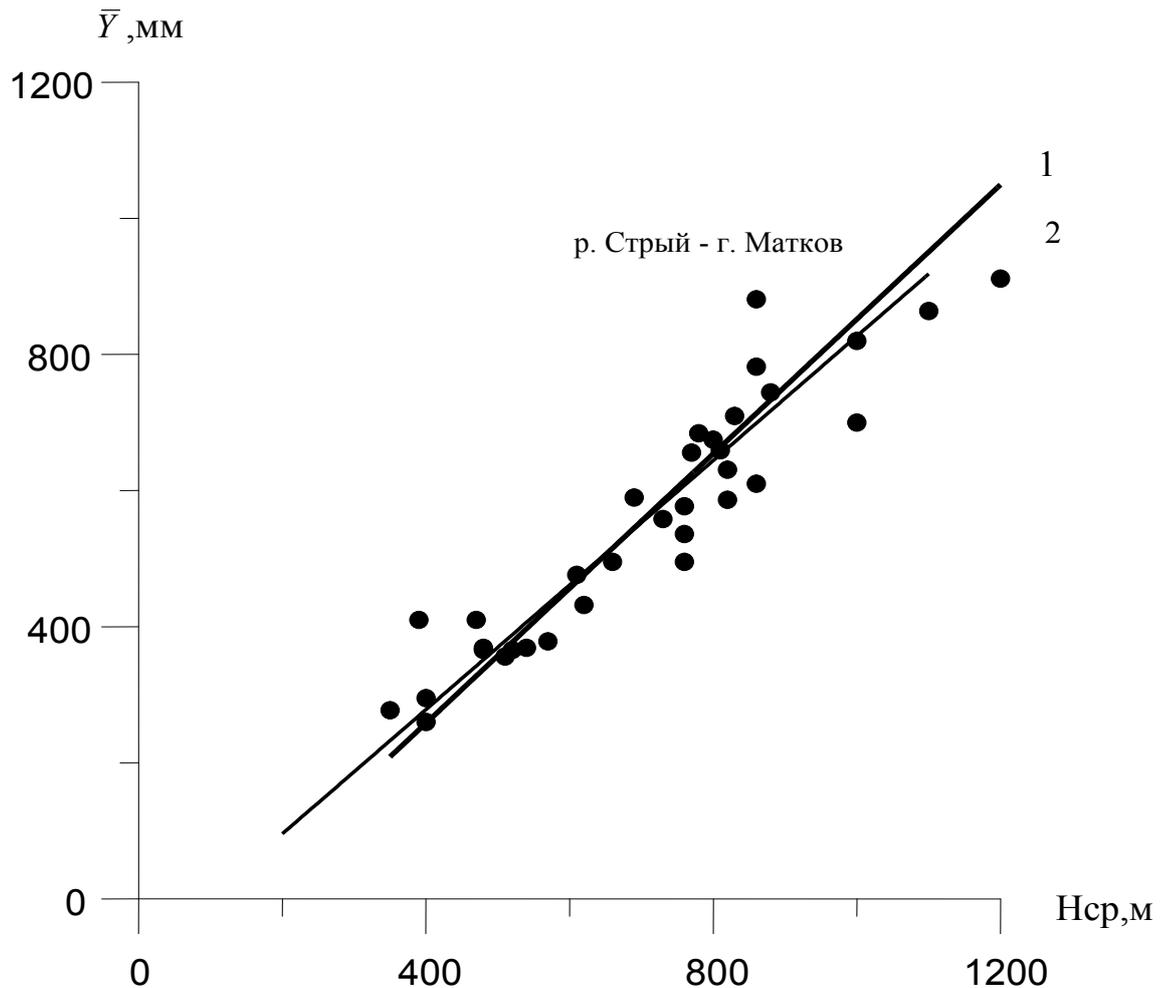


Рис.1.8 Зависимость норм годового стока от средней высоты водосборов

(горная часть бассейна р.Днестр)

1 - зависимость, построенная по метеорологическим данным;

2 - зависимость, приведенная в СНИП 2.01.14-83

- наблюдаемые данные

Исток р. Стрый находится в пределах этого хребта и по условиям формирования должен быть отнесен к бассейну р. Тисы, что обеспечивает точность расчета, равную 2%.

Таким образом, нами был сделан вывод о возможности использования метеорологических данных для построения методик расчета норм естественного годового стока горных регионов на основе уравнений водно-теплового баланса. Полученные результаты имеют перспективное практическое значение, поскольку позволяют оценивать водные ресурсы горных регионов при изменении метеорологических условий, обусловленных изменениями глобального климата.

РАЗДЕЛ 2

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПО УЧЕТУ ФАКТОРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ УКРАИНЫ

2.1. ОЦЕНКА НОРМ ЕСТЕСТВЕННОГО ГОДОВОГО СТОКА С МАЛЫХ И СРЕДНИХ ВОДОСБОРОВ НА БАЗЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТОКА

В данном разделе изложены теоретические и методические аспекты исследования влияния факторов подстилающей поверхности на формирование годового стока и впервые для территории Украины разработаны методические подходы по их количественной оценке на основе карт изолиний норм климатического стока (рис.1.5, рис.1.6), определенных по модифицированному уравнению водно-теплового баланса.

Как отмечалось в разделе 1, норма климатического стока может рассматриваться как интегральная характеристика водных ресурсов Украины, которая отражает зональные особенности распределения годового стока, обусловленные климатическими факторами. Для большинства малых и средних рек, особенно в зоне недостаточного увлажнения, норма климатического (зонального) стока, установленная по карте изолиний может существенно отличаться от соответствующего значения естественного стока [54]. Относительные отклонения рассчитанных и фактических величин достигают в отдельных случаях 30% и более. Как правило, эти отклонения обусловлены влиянием факторов подстилающей поверхности, которое проявляется в большей степени на малых и средних реках с нестабильным грунтовым питанием.

Количественная оценка влияния факторов подстилающей поверхности на ту или иную характеристику стока обычно выполняется на основе метода разностей или последовательного приближения, т.е. путем поэтапного выделения вначале количественных показателей климатических факторов, а уже потом - показателей факторов подстилающей поверхности [126,217]. Нами предложен новый подход по количественной оценке роли факторов подстилающей поверхности, опирающийся на сопоставление норм климатического и естественного стока с малых и средних водосборов [61,63,69,135,140,236,243] с

установлением коэффициента перехода от климатического стока к естественному

$$k = \frac{\bar{Y}_E}{\bar{Y}_K} \quad (2.1)$$

где k - переходный коэффициент;

\bar{Y}_E - норма естественного стока;

\bar{Y}_K - норма климатического стока.

Преимущество такого подхода состоит в том, что норма годового климатического стока \bar{Y}_K , вычисленная на основе уравнения водно-теплового баланса, уже учитывает влияние климатических факторов, исключая при этом воздействие подстилающей поверхности.

На основе переходного коэффициента k на территории Украины были выделены области с положительными ($k > 1$), нулевыми ($k = 0$) и отрицательными поправками ($k < 1$) к норме годового климатического стока малых и средних водосборов

В соответствии с работами А.Н. Бефани [16,17] влияние различных факторов на формирование стока определяется характером их воздействия на поверхностную и грунтовую составляющие годового стока. Согласно генетической теории А.Н. Бефани, суммарный годовой сток можно представить в виде двух составляющих: поверхностной и подземной (грунтовой)

$$\bar{Y} = \bar{Y}_{ПОВ} + \bar{Y}_{ГР}, \quad (2.2)$$

где \bar{Y} - норма суммарного годового стока;

$\bar{Y}_{ПОВ}$ - норма поверхностного годового стока;

$\bar{Y}_{ГР}$ - норма грунтового стока.

Для временных водотоков, не получающих грунтового питания, подземная составляющая равна нулю, т.е.

$$\bar{Y} = \bar{Y}_{ПОВ} \quad (2.3)$$

Выпадающие на поверхность такого водосбора осадки расходуются на испарение и поверхностный сток, а также на пополнение запасов подземных вод, водоносные горизонты которых временными водотоками не дренируются. Норма годового стока этих водотоков меньше зональной.

В природных условиях по мере нарастания водосборной площади происходит постепенное увеличение эрозионного вреза русла реки, а

значит, и возрастание степени дренирования основных водоносных горизонтов подземных вод, т.е. наблюдается увеличение подземного притока в русло реки. Площадь водосбора, при которой река начинает получать грунтовое питание, называется первой критической F_{1KP} . Площадь водосбора, при которой грунтовое питание реки стабилизируется, носит название второй критической F_{2KP} . При $F < F_{2KP}$ факторы подстилающей поверхности, обуславливающие увеличение доли грунтовой составляющей (залесенность, карст и т.п.), усиливают различие между зональным и фактическими стоком водосборов за счет неполного дренирования всех водоносных горизонтов подземных вод. При $F \geq F_{2KP}$ суммарный сток с водосбора, как правило, равен зональному. По характеру грунтового питания водосборы с $F < F_{1KP}$ отнесены, по А.Н. Бефани, к категории малых рек, а водосборы с $F_{1KP} \leq F < F_{2KP}$ - к категории средних.

○ Для водосборов с площадью $F < F_{2KP}$ нами выделены следующие области поправок к норме климатического стока:

- область отрицательных поправок - для зоны смешанных лесов Украины и Карпатских гор;
- область нулевых поправок - для Западно- Украинской лесостепной зоны;
- область положительных поправок – для водосборов лесостепи и Северной степной подзоны;
- область отрицательных поправок – для Южной степной подзоны;
- области переменных поправок – для закарстованных водосборов.

На основе рассчитанных по (2.1) переходных коэффициентов и количественных показателей факторов подстилающей поверхности (залесенность, заболоченность, норма инфильтрации осадков в водоносные горизонты и т.д.) разрабатывались уравнения множественной регрессии (с пошаговым выбором оптимальных предикторов [268]).

Остановимся подробно на научно-методическом обосновании построения расчетных уравнений для каждой из перечисленных областей.

Зона смешанных лесов Украины принадлежит к области избыточного и достаточного увлажнения с значительным вкладом грунтового питания в формирование годового стока рек. Поэтому основной причиной различий между нормами естественного и климатического стока является неполное дренирование руслом реки водоносных горизонтов подземных вод. Расчеты климатического стока по уравнению водно-теплового баланса (1.43) предусматривают, что выпавшие осадки полностью затрачиваются на формирование суммарного годового стока (поверхностного и грунтового) и испарение с поверхности суши, что является справедливым для водосборов с площадью, превышающей вторую критическую ($F \geq F_{2KP}$). Именно в этом случае река полностью перехватывает

подземные водоносные горизонты и её грунтовое питание равно норме инфильтрации осадков в грунтовые воды U_0 . Для малых и средних рек ($F < F_{1KP}$ и $F_{1KP} \leq F < F_{2KP}$) между нормами климатического (зонального) и естественного стока могут наблюдаться существенные различия, которые можно выразить в виде зависимости переходных коэффициентов k от площади водосбора F , косвенно характеризующей степень дренирования рекой водоносных горизонтов. Например, для малых и средних водосборов рек Полесской низменности, характеризующихся слабым эрозионным врезом в земную поверхность с значением второй критической площади равной 1700 км^2 , предложена следующая расчетная зависимость [174,175]

$$k = 1 - 0,270[3,2 - \lg(F + 1)], \text{ при } F < 1700 \text{ км}^2; \quad (2.4)$$

$$k = 1 \text{ при } F \geq 1700 \text{ км}^2 \quad (2.5)$$

Для Украинских Карпат, где вклад грунтового питания в суммарный годовой сток значительно ниже по сравнению с Полесьем, к показателям факторов подстилающей поверхности отнесена не только площадь водосбора, но и залесенность f_l . С одной стороны, лес повышает инфильтрацию выпадающих осадков в водоносные горизонты, и, следовательно, способствует увеличению грунтового питания, с другой, - уменьшается поверхностный сток рек. Результирующий эффект зависит от соотношения между поверхностным и подземным питанием рек. На базе данных о стоке малых и средних водосборов горной части р.Днестр [146], а также Закарпатской водно-балансовой станции, установлено, что на склонах горных водосборов с площадью меньшей второй критической ($F < 300 \text{ км}^2$) и значительной залесенностью ($f_l > 40\%$), потери на инфильтрацию стока в недренируемые малыми водотоками горизонты грунтовых вод существенны и могут быть учтены в расчетах норм естественного годового стока при помощи следующих переходных коэффициентов

$$k = 1 - 0.003(f_l - 40), \text{ } r=0,750 \text{ при } F < 300 \text{ км}^2 \text{ и } f_l > 40\% \quad (2.6)$$

где f_l - относительная площадь водосбора, занятая лесом, %.

В данном случае залесенность рассматривается как косвенный показатель высокой водопроницаемости лесных почв.

Западно-Украинская провинция лесостепной зоны принадлежит к области нулевых поправок. Другими словами, нормы климатического годового стока малых и средних рек здесь в основном тождественны нормам естественного (рис. 2.1), вследствие близкого к поверхности

залегания подземных вод и достаточного глубокого эрозионного вреза русел в земную поверхность даже при относительно малых площадях водосборов [174,175,219].

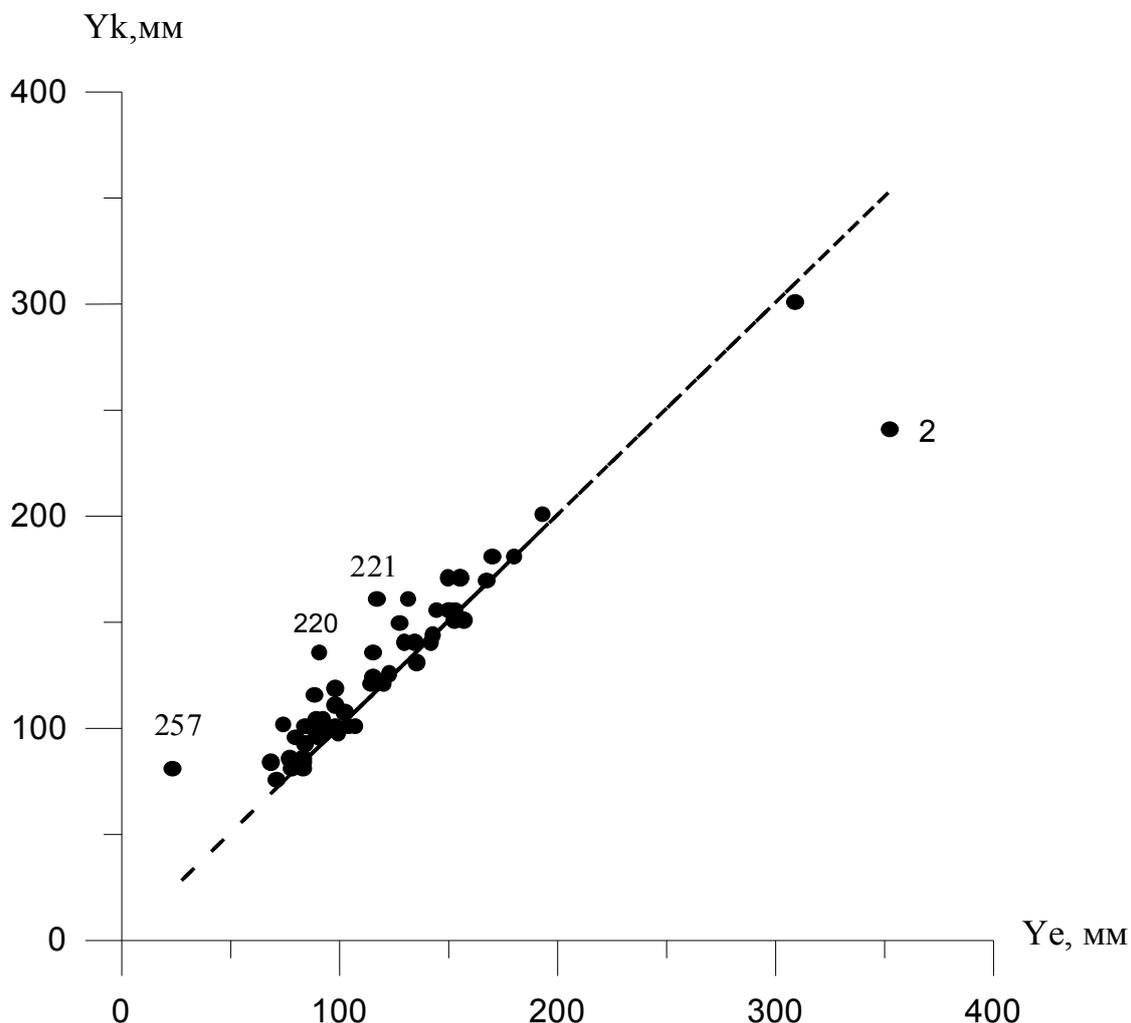


Рис. 2.1 Сравнение норм естественного и климатического годового стока рек западной части Украинского Полесья и Подолья
- - - линия равных значений

Для всех левобережных притоков р.Днестр и верхнего течения р.Западный Буг, расположенных в пределах Волыно-Подольского артезианского бассейна, доля грунтового питания превышает 50%. Влияние закарстованности на величины норм годового стока для водосборов с площадью более 150 км^2 выражено слабо и находится в пределах точности их расчета. Более того, с увеличением площадей водосборов это влияние

снижается. Так, норма годового естественного стока с закарстованного водосбора р.Гнилая Липа – г.Рогатин ($F = 467 \text{ км}^2$) больше климатической на 10%, с водосбора р.Золотая Липа – г.Задаров ($F = 1390 \text{ км}^2$) – лишь на 6,0% .

Существенные различия между нормой климатического и естественного стока возникают при несовпадении поверхностного и подземного водосборов рек, в бассейнах которых находится область разгрузки или питания карстовых водоносных горизонтов. В этом случае коэффициент перехода k (см. 2.1) может быть использован в качестве количественного показателя преобразования стока в результате участия карстовых вод в его формировании. Например, $k = 1.47$ для водосбора р.Западный Буг – г.Сасов ($F = 107 \text{ км}^2$, точка 2 на рис.2.1), в пределах которого находится зона разгрузки карстовых вод [194].

Следует отметить, что на закарстованных водосборах переходные коэффициенты k могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, в зависимости от существующих гидрогеологических условий. В частности, на рис. 2.2 приведен пример

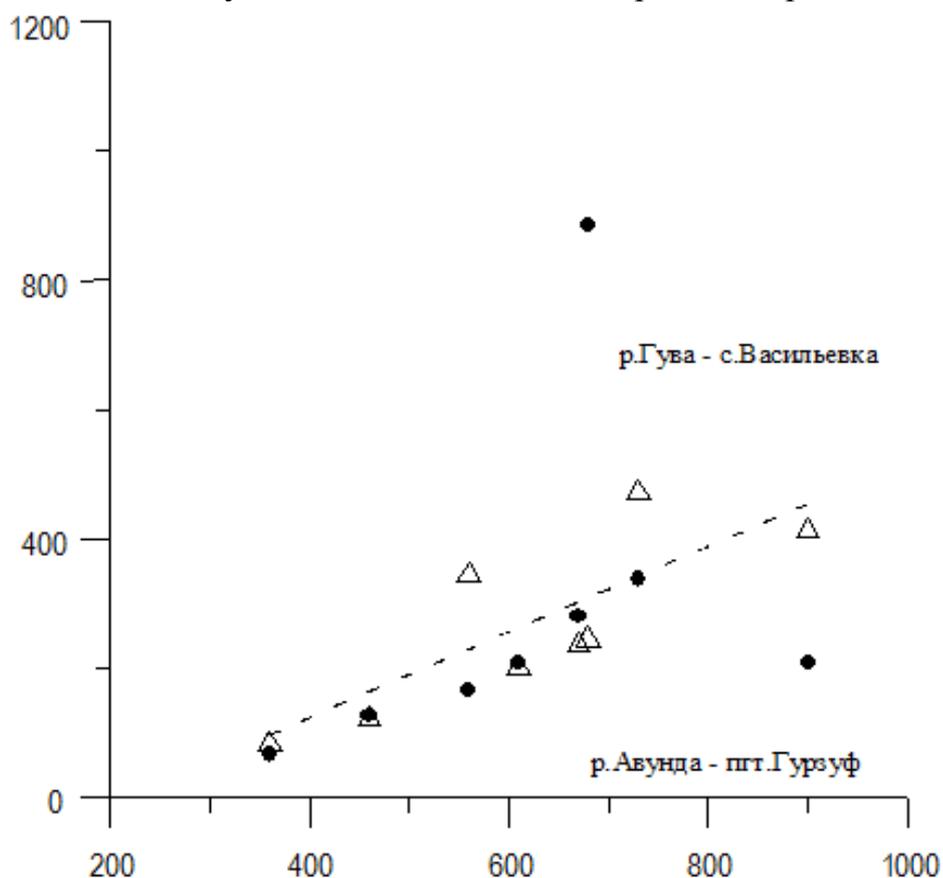


Рис. 2.2 Зависимость фактических и рассчитанных ($n=3$) по методу водно-теплового баланса среднееголетних величин годового стока от средней высоты водосбора для юго - западного побережья
Точки на графике соответствуют нормам естественного годового стока

сопоставления норм климатического и естественного годового стока для рек юго-западного побережья Горного Крыма [153]. Наибольшие отклонения сравниваемых величин установлены для водосборов р.Гува – с.Васильковка и р.Авунда – пгт.Гурзуф. В бассейне реки Авунды расположена область питания подземных вод: карстовые воды Никитской яйлы “уходят” в бассейн р.Качи, в результате чего естественный сток рассматриваемой реки оказывается значительно меньше климатического. В бассейне р. Гувы, наоборот, находится область разгрузки (выхода в виде источников) карстовых вод, что приводит к значительному превышению естественного стока по отношению к климатическому. Коэффициенты влияния карста соответственно равны: для р.Авунда – пгт.Гурзуф - $k = 0,50$, а для р. р.Гувы – с. Васильевка - $k = 3,6$.

Аналогичным образом были выявлены водосборы с положительным подземным водообменом в бассейне р.Оскол и отрицательным в бассейне р.Казенный Торец [61].

К области положительных поправок к норме климатического стока отнесены водосборы лесостепи и Северной степи ($F < F_{2KP}$), где вклад подземных вод в формирование годового стока незначителен (около 5%), и суммарная величина годового стока определяется, в основном, весенним половодьем. Снежный покров, от запаса воды в котором зависит объем стока за весеннее половодье, распределяется по площади неравномерно [54]. Под влиянием ветра происходит перераспределение снежного покрова в речной сети с последующей аккумуляцией его в оврагах и балках, что приводит к уменьшению норм стока с увеличением площади водосбора. Фактически действующая площадь водосбора, на которой формируется основной объем стока половодья в замыкающем створе, оказывается значительно меньшей общей площади водосбора. В результате нормы естественного годового стока становятся выше зональных (климатических) норм. По данным о стоке рек Молдовы и юго-западной Украины для расчета переходных коэффициентов было разработано уравнение вида [69]

$$k = 2,4 - 0,7[\lg(F + 1) - 1], \text{ при } F < 1000 \text{ км}^2; \quad (2.7)$$

$$k = 1, \text{ при } F \geq 1000 \text{ км}^2 \quad (2.8)$$

В подзоне Южной степи, где устойчивый снежный покров наблюдается очень редко и значительная роль в формировании годового стока принадлежит дождевым осадкам, среди факторов подстилающей поверхности основное место занимают потери на задержание поверхностных вод в понижениях рельефа [54,58,76]. Таким образом, для этого региона Украины характерны отрицательные поправки к нормам климатического стока. Косвенным показателем потерь стока на

поверхностное задержание может служить уклон водосбора. Поскольку данные о средневзвешенных уклонах в справочной литературе есть далеко не по всем водосборам, для практического применения получена зависимость коэффициента k от средней высоты водосбора, значения которого определенным образом связаны с уклоном. Переходные коэффициенты уменьшаются от 1 до нуля по мере снижения высоты местности, но лишь в границах высот меньше 280м

$$k = 1 - 0,003(280 - H_{CP}), \text{ при } H_{CP} < 280\text{м}; \quad (2.9)$$

$$k = 1, \text{ при } H_{CP} \geq 280\text{м}, \quad (2.10)$$

где H_{CP} - средняя высота водосбора.

Граница раздела между областями положительных (2.7-2.8) и отрицательных поправок (2.9-2.10) поправок соответствует границе зим с устойчивым снежным покровом, наблюдающимся менее, чем в 50% случаев. В табл.2.1 приведен расчет коэффициентов перехода для независимой выборки (водосборы, не вошедшие в разработку методики), из которой следует, что определение норм годового естественного стока на основе климатического с использованием переходных коэффициентов дает удовлетворительные результаты.

К числу факторов подстилающей поверхности принадлежат и гидрогеологические факторы. Так, например, Донецкий Кряж в своем естественном состоянии представлял собой оазис лесостепи в степной зоне [76]. Повышенный в сравнении с зональным (климатическим) сток этой части Украины обусловлен не только увеличением осадков за счет влияния орографии, но и высокой водопроницаемостью почв, способствующей возростанию запасов подземных вод и уменьшению потерь на испарение с поверхности суши. В качестве количественного показателя влияния гидрогеологических условий на формирование стока может быть использована норма инфильтрации осадков U_0 в водоносные горизонты, пространственное распределение которой определяется как климатическими условиями, так и водно-физическими свойствами почв[219]. Так, для рек Приазовья, берущих начало в пределах Донецкого Кряжа, с целью определения переходного коэффициента k разработано регрессионное уравнение вида [243]

$$k = 1 + 0,080U_0, \quad (2.11)$$

отражающее существование повышенной водности за счет своеобразного гидрологического строения рассматриваемого региона.

Таблица 2.1

Сравнение норм естественного стока рек Молдовы и юго-западной Украины, рассчитанных на основе метода водно-теплового баланса, с фактическими

Река - пункт	F , км ²	$\lg(F + 1)$	H_{CP} , м	\bar{Y}_K , мм	k	\bar{Y}_E , мм	\bar{Y}_Φ , мм	$\delta = \frac{\bar{Y}_E - \bar{Y}_\Phi}{\bar{Y}_\Phi} \cdot 100\%$
Область отрицательных поправок к норме климатического стока								
р.Малый Чулук –с.Теленешты	566	2,75	140	50,0	0,61	30,5	32,5	-6,20
р.Икель – с.Пашканы	562	2,75	180	43,0	0,73	31,3	30,9	1,20
р.Рыбница –с.Андреевка	152	2,18	180	28,0	0,73	20,4	22,7	-10,0
р.Ягорлык – с.Дойбаны	1220	3,09	170	34,0	0,70	23,8	25,5	-6,70
р.Молокиш -с.Молокиш	184	2,27	180	55,0	0,70	38,5	35,0	10,0
Область положительных поправок к норме климатического стока								
р.Ров – с.Демидовка	1130	3,05	230	95,0	1,00	95,0	100	-5,00
р.Соб – с.Зозов	92,5	1,97	290	75,0	1,70	128	123	4,00
р.Горный Тикич- с.Юрполь	2620	3,05	230	63,0	1,00	63,0	63,7	-1,10
р.Дохна –с.Большая Киреевка	1200	3,08	230	48,0	1,00	48,0	46,7	1,30
р.Каменка-с.Кубань	284	2,45	170	35,0	1,35	47,2	44,0	7,3
р.Галдаруша – с.Кажба	79,5	1,90	170	35,0	1,70	56,1	49,5	13,3
р.Реут – г.Бельцы	1040	3,02	180	35,0	1,00	35,0	37,5	-6,70
р. Реут – г.Флорешты	3400	3,53	-	38,0	1,00	38,0	42,3	-10,1
р.Куболта –с.Куболта	869	2,94	190	40,0	1,03	41,2	44,1	-6,60
р.Батыг – г.Замехов	94,1	1,97	290	70	1,72	120	130	-7,60
р.Мурафа – с.Кудиевцы	70,0	1,84	330	65	1,81	118	112	3,30
р.Марковка – с.Марковка	59,7	1,78	260	60,0	1,85	111	121	-8,26
р.Марковка – Слобода Подлесовская	615	2,79	240	55,0	1,15	64	72	-12,1
р.Каменка – с.Каменка	387	2,59	230	60,0	1,29	77	73	5,40
р.Кайнар-с.Севиорово	814	2,91	200	50,0	1,06	53,1	56,0	-5,10

2.2. ОЦЕНКА НОРМ ЕСТЕСТВЕННОГО ГОДОВОГО СТОКА ПРИ БЛИЗКОМ ЗАЛЕГАНИИ К ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТОВЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ РЕК ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ УКРАИНСКОГО ПОЛЕСЬЯ)

Норма годового климатического стока, полученная по уравнению (1.43), может не соответствовать норме естественного стока на заболоченных землях даже больших водосборов, поскольку в случае отсутствия достаточного дренажа наблюдается не только подпор капиллярной каймы, но и выклинивание грунтовых вод на дневную поверхность. Для учета участия грунтовых вод в процессе испарения с поверхности суши нами было использовано уравнение водно-теплового баланса, в состав которого вводилась составляющая, характеризующая приток грунтовых вод к поверхности. Величина H , характеризующая ресурсы увлажнения водосбора в уравнении (1.40) преобразуется к виду [75]

$$H_g = H + g + w_1 - w_2, \quad (2.12)$$

где g - грунтовые воды, принимающие участие в формировании стока с водосбора.

В случае, когда наблюдается высокий уровень стояния грунтовых вод, суммарное испарение с поверхности суши возрастает. При этом выполняется соотношение

$$\beta_E < \beta_{E_g} < 1, \quad (2.13)$$

которому удовлетворяет зависимость

$$\beta_{E_g} = \beta_E + (1 - \beta_E)k_g, \quad (2.14)$$

где $\beta_{E_g} = \frac{E_g}{E_m}$;

E_g - испарение при близком залегании грунтовых вод;

k_g - коэффициент, связанный с уровнем грунтовой воды так, что при глубине залегания грунтовых вод h_{Γ} должны выполняться следующие условия

$$\text{если } h_{\Gamma} \rightarrow 0, \text{ то } k_g \rightarrow 1; \quad (2.15)$$

$$\text{если } h_{\Gamma} \rightarrow \infty, \text{ то } k_g \rightarrow 0, \quad (2.16)$$

т.е.

$$\text{если } k_g \rightarrow 1, \text{ то } \beta_{E_g} \rightarrow 1; \quad (2.17)$$

$$\text{если } k_g \rightarrow 0, \text{ то } \beta_{E_g} \rightarrow \beta_E \quad (2.18)$$

Этим требованиям удовлетворяет следующее соотношение [59]

$$k_g = 1 - \left[1 + (rh_{\Gamma} / nh_K)^{-nr} \right]^{-1/n}, \quad (2.19)$$

где r - параметр, учитывающий водно-физические свойства почв [191];

h_K - высота капиллярной каймы рассматриваемого вида почв.

При отсутствии данных о высоте капиллярной каймы ее можно определить приближенно по эмпирической формуле [75]

$$h_K = 0,02(600 - W_{HB}) \cdot 10^{-6} W_{HB}^3, \quad (2.20)$$

где W_{HB} - наименьшая влагоемкость метрового слоя почвы, мм;

h_K - высота капиллярной каймы, см.

Расчет испарения с поверхности суши при близком залегании грунтовых вод опирается на зависимость (2.14)

$$E_g = E + E_m \left(1 - \frac{E}{E_m} \right) k_g, \quad (2.21)$$

где E_g - испарение при близком залегании грунтовых вод;

E - испарение с поверхности суши при глубоком залегании грунтовых вод;

При этом второе слагаемое в (2.21) определяет дополнительное испарение с поверхности, сформировавшееся за счет притока грунтовых вод g .

Практические расчеты проще выполнять, подставив (1.26) в выражение (2.14), откуда

$$\beta_{E_g} = k_g + (1 - k_g) \left[1 + (\beta_H)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (2.22)$$

Для многолетнего периода, когда $w_1 - w_2 = 0$, $H = \bar{X}$, и $\beta_H = \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m}$.

Величина испарения с поверхности суши при близком залегании грунтовых вод рассчитывается по выражению

$$E_g = \beta_{E_g} E_m \quad (2.23)$$

При этом значение E_m принимается неизменным для заболоченных и незаболоченных участков, поскольку оно определяется только климатическими факторами.

Уравнения (2.19), (2.22) и (2.23) использовались для оценки норм испарения с поверхности суши при фактической глубине залегания грунтовых вод, взятой из [220]. Параметр r , отражающий водно-физические свойства почв, определялся в соответствии с рекомендациями, приведенными в [160]. Для исследуемой территории параметр r , в основном, принимался равным 2,0, так как в Полесьи преобладают лессовые почвы [55,230].

Однако, грунтовые воды влияют не только на испарение с поверхности суши, но и являются составляющей ресурсов увлажнения (2.12). Для многолетнего периода

$$\bar{H}_g = \bar{H} + \bar{g} \quad (2.24)$$

В таком случае, норма климатического стока, должна рассчитываться по выражению

$$\bar{Y}_{Kg} = \bar{H}_g - \bar{E}_g, \quad (2.25)$$

Поскольку данные наблюдений за составляющей g , как правило, отсутствуют, используется одна из модификаций уравнений водно-теплового баланса, в которой в отличие от (1.26) β_H представлена как функция β_E [191]

$$\beta_H = (\beta_E^{-n} - 1)^{-\frac{1}{n}} \quad (2.26)$$

или

$$\beta_{Hg} = (\beta_{Eg}^{-n} - 1)^{-\frac{1}{n}}, \quad (2.27)$$

где β_{Eg} определяется по (2.14).

Нами расчет норм климатического стока выполнялся по соотношениям

$$\beta_{Yg} = \beta_{Hg} - \beta_{Eg} \quad (2.28)$$

и

$$\bar{Y}_{Kg} = \beta Y_g \bar{E}_m \quad (2.29)$$

По данным 33 метеорологических станций западной части Украинского Полесья была построена карта изолиний среднемноголетней глубины залегания грунтовых воды рассчитана высота капиллярного поднятия h_K . Наиболее близко к поверхности грунтовые воды располагаются непосредственно в пределах Полесской низменности ($h_K < 4$ м), наиболее глубоко – на водоразделе рек Припять-Днестр (глубина залегания более 12-14м). Расчеты норм климатического стока по (2.28),(2.29) с учетом глубины залегания грунтовых вод позволяют сделать вывод о том, что увеличение норм климатического стока за счет участия грунтовых вод, превышающее 10% , имеет место только на крайнем северо-западе (р.Выжевка) и в районе Словечанско-Овручанского Кряжа. На остальной части территории влиянием грунтовых вод можно пренебречь. Уточненная (с учетом глубины залегания грунтовых вод) карта изолиний норм климатического стока для западной части Украинского Полесья приведена на (рис. 2.2).

Обобщения по суммарному испарению с болот, выполненные в работе [256] для территории Белоруссии, показывают, что основная доля выпадающих на болото осадков затрачивается на испарение и транспирацию. Выпадающие на болото осадки теплого периода лишь на небольшой части территории преобразуются в сток, а в южной части страны (Припятское Полесье) они вовсе не попадают в реки и последние питаются, в основном, выклинивающимися на болото грунтовыми водами и поверхностными водами с внешних минеральных водосборов. Таким образом, болота, по мнению В.Ф. Шебеко[256,257], обеспечивают увеличение потерь на испарение с поверхности водосбора за счет участия в процессе испарения залегающих близко к поверхности грунтовых вод.

Испарение с поверхности болот часто принимают равным испарению с водной поверхности водосборов [37]. В [193] рекомендуется карта изолиний средних многолетних величин испарения для водоемов стандартного размера с глубиной 2м и разгоном 2км за безледоставный период (апрель-ноябрь). Недостатком данной карты является неувязка ее со смежными территориями Украины [196] и Литвы [195]. Так, для верховий р.Припять по белорусской карте испарение с водной поверхности равно 640 мм, а по украинской – 550мм. Для устья р. Припять на белорусской территории испарение с водной поверхности равно 700мм, а на украинской – 550 мм.

В [164] по формуле для расчета испарения с поверхности водоемов [233] были определены величины испарения по 40 опорным станциям, которые впоследствии приводились к фактическим данным, взятым по испарительным бассейнам на основе графика связи. При этом фактическое испарение с поверхности испарительных бассейнов оказывалось ниже расчетного. Потери на дополнительное испарение с поверхности болот рассчитывались при этом как разница между испарением с водной

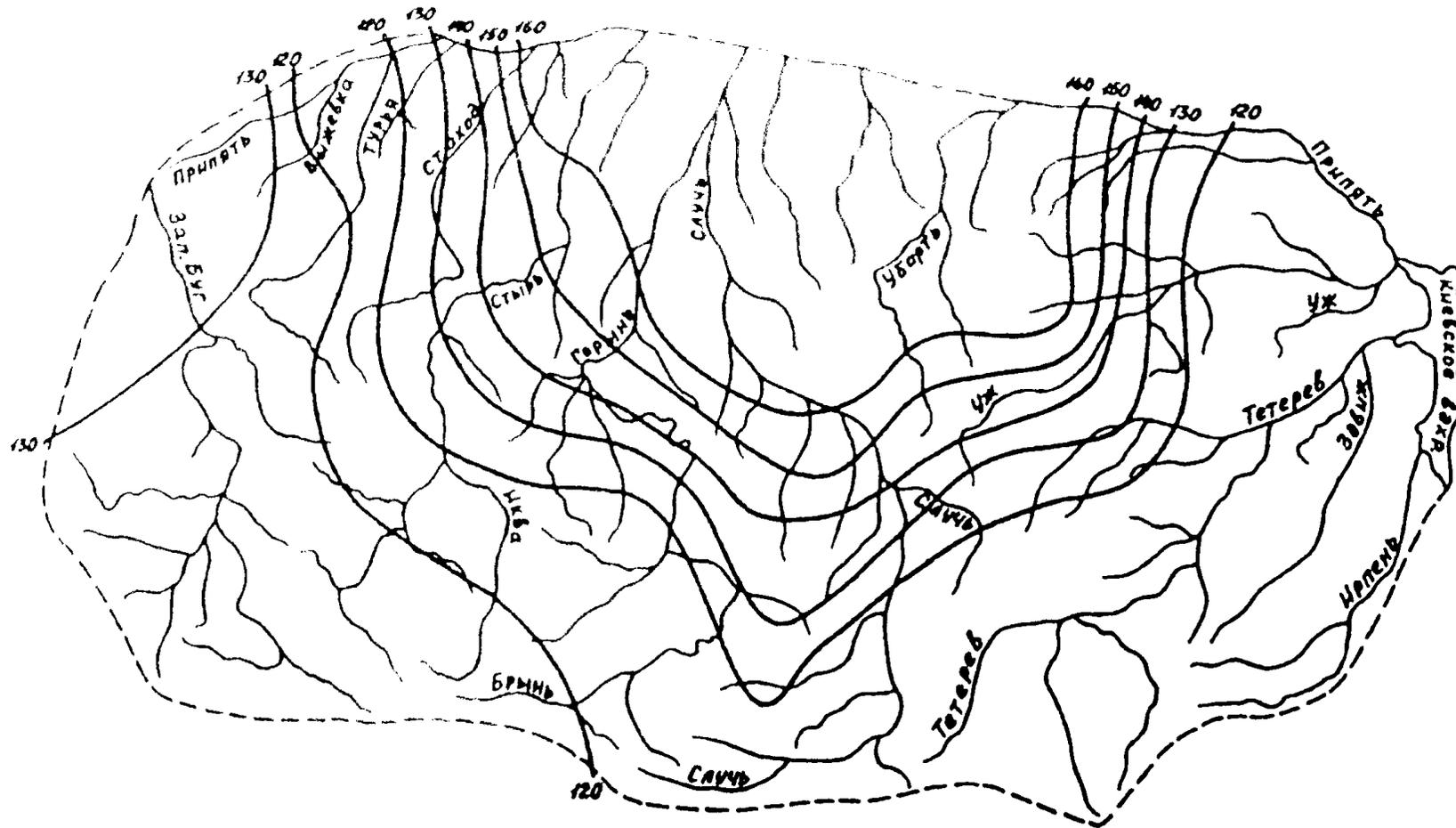


Рис.2.3 – Распределение норм климатического годового стока \bar{Y}_{kg} (мм), рассчитанных с учетом глубины залегания грунтовых вод, на территории западной части Украинского Полесья
 ,----- - граница исследуемой территории

поверхности и испарением с поверхности суши за теплый период (апрель – ноябрь). Однако, в работе [37] отмечается, что фактическое испарение с торфяников выше, чем испарение с водной поверхности.

Нами потери на дополнительное испарение с поверхности болот рассматривались как разница между испарением с суши при близком залегании грунтовых вод \bar{E}_g и при отсутствии влияния грунтовых вод \bar{E} . При расчетах испарения с поверхности суши учитывалась среднемноголетняя глубина залегания грунтовых вод по данным метеостанций и рассматривался случай, когда $\frac{h_\Gamma}{h_K} = 1$, что отвечает

условиям подпора грунтовыми водами капиллярной каймы (табл. 2.2).

Величины норм испарения с поверхности суши без учета влияния грунтовых вод рассчитывались по уравнению (1.27), представленному для многолетнего периода в виде

$$\bar{E} = \bar{E}_m \left[1 + \left(\frac{\bar{X}}{\bar{E}_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (2.30)$$

где \bar{E} - годовая норма испарения с поверхности суши;

\bar{E}_m - годовая норма максимально возможного испарения с поверхности суши;

\bar{X} - норма годовых осадков.

Полученные значения \bar{E} изменяются по территории от 520 мм до 565. Нормы испарения с поверхности суши, рассчитанные с учетом фактической глубины залегания грунтовых вод (\bar{E}_g), отличаются от \bar{E} незначительно. Дополнительное испарение составляет 30-50мм только на крайнем северо-западе Украинского Полесья и в районе Словечанско-Овручанского Кряжа. Для случая, когда $\frac{h_\Gamma}{h_K} = 1$, что соответствует болотам,

дополнительное испарение $\bar{E}_g - \bar{E}$ представляет собой величину, составляющую в среднем 130 мм.

Потери стока на дополнительное испарение с поверхности болот можно учесть в уравнении водного баланса водосборов следующим образом

$$Y_{\text{Б}} F = YF - (E_g - E)F_B, \quad (2.31)$$

где $Y_{\text{Б}}$ - слой стока с водосбора, в пределах которого находятся болота;

F - площадь водосбора; E_g - слой испарения с поверхности болота, т.е.

слой испарения для условия $\frac{h_\Gamma}{h_K} = 1$;

Таблица 2.2 - Расчет дополнительного испарения с поверхности суши при различной глубине залегания грунтовых вод

Название метеостанции	\bar{E} , мм	\bar{E}_g , мм (h_Γ принято по данным метеостанций)	\bar{E}_g , мм при $\frac{h_\Gamma}{h_K} = 1$	$\bar{E}_g - \bar{E}$, мм	$\bar{E}_g - \bar{E}$, мм при $\frac{h_\Gamma}{h_K} = 1$
Любешов	565	605	700	40	135
Свитязь	536	593	706	57	169
Маневичи	600	606	715	6	115
Ковель	578	579	707	1	129
Владимир Волынский	572	572	699	0	127
Луцк	568	569	704	0,82	136
Сарны	562	563	707	0,87	144
Ровно	574	575	699	0	125
Кременец	582	582	707	0	125
Тернополь	569	569	693	0	124
Бережаны	590	590	690	0	99
Чортков	579	580	718	0,5	139
Шепетовка	576	576	697	0	121
Ямполь	552	552	687	0	135
Овруч	563	661	698	32	136
Олевск	581	655	683	21	102
Коростень	563	651	684	29	121
Новоград Волынский	574	586	697	12	123
Житомир	572	573	711	0	138
Чернобыль	534	611	714	14	180
Полесское	538	605	694	12	156
Щорс	563	563	716	0	163
Новые Млыны	550	551	689	0	139
Нежин	571	571	719	0	148
Хмельник	549	549	701	0	153
Липовец	531	531	702	0	171
Винница	544	544	694	0	150
Жмеринка	524	524	704	0	180
Крыжополь	539	539	737	0	198
Могилев Подольский	521	521	794	0,43	274
Лохвица	520	520	738	0	218
Полтава	547	547	772	0	226

E - слой испарения с поверхности суши;

F_B - площадь водосбора, занятая болотами.

Выражение (2.31) можно выразить относительно слоя стока

$$Y_{fB} = Y - (E_g - E)f_B, \quad (2.32)$$

где $(E_g - E)f_B = \Delta Y_{fB}$ - дополнительный слой испарения с поверхности болот;

f_B - заболоченность.

Влияние дополнительного испарения с поверхности болот и заболоченных участков на норму годового стока может быть интегрально представлено коэффициентом

$$k_B = \frac{\bar{Y}_{fB}}{\bar{Y}_K}, \quad (2.33)$$

где \bar{Y}_{fB} - норма климатического стока при фактической заболоченности водосбора [190] f_B (табл. 2.3), рассчитанная по (2.32).

Таблица 2.3 - Оценка влияния дополнительного испарения с поверхности болот при условии $\frac{h_\Gamma}{h_K} = 1$ на норму климатического стока

Река - пункт	\bar{Y}_K , мм	f_B , %	$\bar{E}_g - \bar{E}$ мм,	\bar{Y}_{fB} , мм	$k_B = \frac{\bar{Y}_{fB}}{\bar{Y}_K}$
р.Выжевка - пгт.Старая Выжевка	120	9	130	108	0,90
р.Турья - с.Ягодное	120	7	130	111	0,92
р.Турья - г.Ковель	115	6	130	107	0,93
р.Турья - с.Бузаки	100	10	130	87	0,87
р.Стоход - с.Гулевка	120	9	130	109	0,90
р.Стоход - пгт.Любешов	139	8	140	124	0,92
р.Стырь - с.Шуровцы	143	9	130	131	0,92
р.Стырь - г.Луцк	140	6	130	132	0,94
р.Стырь - с.Млынок	125	5	140	118	0,94
р.Родоставка - с.Тройца	150	12	130	134	0,90
р.Иква - с.Радянское	150	1	130	149	0,99
р.Горынь - пгт.Ямполь	140	1	130	139	0,99
р.Горынь -с.Ожежин	140	2	130	137	0,98
р.Горынь - с.Деражное	145	2	130	142	0,98
р.Вырка -с.Сварыни	155	13	140	117	0,87
р.Бережанка – с. Подлесное (Рудня)	160	6	140	152	0,95
р.Тня - с.Броники	92	1	130	91	0,99
р.Смолка - с.Суслы	103	2	130	100	0,97
р.Льва - с.Осницк	160	3	120	156	0,98
р.Уборть - с.Рудня Ивановская	97	5	120	91	0,94
р.Уборть - с.Перга	125	4	120	118	0,96
р.Уж - пгт.Полесское	100	6	130	92	0,92
р.Жерев - с.Вязовка	120	16	130	99	0,83
р.Грезля - с.Давыдки	110	9	130	104	0,94
р.Тетерев - с.Троща	110	1	130	109	0,99
р.Тетерев - г.Житомир	80	2	130	77	0,97
р.Гнилопять - с.Головинка	97	2	130	94	0,97
р.Гуйва - с.Городковка	100	1	130	99	0,99
р.Ирша - пгт. Володарск Волынский	95	1	130	94	0,99
р.Ирша – с.Украинка	89	2	130	82	0,97

Поскольку относительные площади, занятые болотами, незначительны, а значения стока велики, дополнительное испарение с поверхности болот даже при условии подпора грунтовыми водами капиллярной каймы практически не влияет на сток. Уменьшение норм климатического стока для большинства заболоченных водосборов находится в пределах точности расчета норм годового стока - -5%. Наибольшее снижение норм годового стока имеет место на водосборах р.Турья – с. Бузаки ($f_B = 10\%$); р.Вырка – с.Сварыни ($f_B = 13\%$); р. Жерев – с.Вязовка ($f_B = 16\%$), т.е. водосборах с $f_B \geq 10\%$. Таким образом, можно сделать вывод, что карта изолиний норм годового климатического стока, представленная на рис.1.5 применима для всей территории Украины.

РАЗДЕЛ 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЯДОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ГОДОВОГО СТОКА НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ПОЛЕЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Речной сток формируется, прежде всего, в результате взаимодействия климатических факторов в конкретных условиях соотношения тепла и влаги. Поскольку климатические факторы подчиняются законам широтной и вертикальной зональности, то и пространственное распределение стока также подчиняется этим законам, отражая в той или иной мере климатические воздействия. Зависимость стока от климатических факторов нашла свое отражение в пространственном распределении норм климатического стока, рассчитанного на основе уравнения водно-теплового баланса. Однако, помимо климатических характеристик, связанных, прежде всего, с атмосферными процессами макромасштаба, в формировании стока принимают также участие физические процессы мезомасштаба, обусловленные воздействием естественных и искусственных (антропогенных) внутрибассейновых факторов подстилающей поверхности. В данном разделе рассматривается проблема количественной оценки вклада различных факторов в формирование структуры полей годового стока на основе метода главных компонент [9,97,161,216,235,268,279,282] и приводится использование полученных результатов для моделирования хронологических рядов естественного годового стока при отсутствии данных наблюдений.

3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Метод главных компонент (естественных ортогональных функций) представляет собой один из методов линейного преобразования информации, заключающийся в линейном ортогональном преобразовании полей исходных величин в базисе собственных векторов матрицы корреляций или ковариаций. Другими словами, на основе матриц корреляции определяется система ортогональных, линейно независимых,

функций, которые принято называть собственными векторами, соответствующими системе независимых случайных величин, именуемых собственными значениями или собственными числами матрицы корреляций. Поиск собственных векторов и собственных значений достигается путем решения матричного уравнения вида

$$R_X - \lambda_i U_i = 0, \quad (3.1)$$

где R_X - матрица коэффициентов корреляции размером $m \times m$ (m соответствует числу рассматриваемых объектов);

U_i - собственный вектор матрицы корреляций;

λ_i - соответствующее собственному вектору собственное значение.

Матрица R_X имеет m корней или m собственных чисел λ , которые являются действительными, положительными и простыми. Для нахождения m собственных векторов, соответствующих m собственным числам, необходимо решение m систем линейных уравнений. Процедура расчета осуществляется, как правило, при помощи итерационных методов, среди которых наиболее распространённым является метод Якоби [154,268].

Совокупность собственных векторов образует базис, в котором производится разложение полей исходных данных

$$U' \cdot \varphi_i = Z_i, \quad (3.2)$$

где U' - транспонированная матрица U размером $m \times m$;

φ_i - i -тый случайный вектор (поле) центрированных и нормированных исходных данных, которое подлежит разложению;

Z_i - вектор главных компонент, являющийся результатом линейного преобразования φ_i - того поля соответствующим собственным вектором.

Поскольку собственные векторы ортонормированны, главные компоненты поля являются статистически независимыми. Равенство (3.2) означает, что исходное поле разложено на m независимых компонент.

Составляющие вектора Z_i для p -той компоненты разложения определяются следующим образом

$$z_{ip} = \sum_{k=1}^m U_{pk} \varphi_{ik} ; p = \overline{1, m}, \quad (3.3)$$

где z_{ip} - составляющие p -той компоненты разложения; U_{pk} - весовые коэффициенты, отражающие вклад k -того объекта в каждую p -тую

компоненту (или вклад p -той компоненты в k -ый объект), которые являются составляющими собственных векторов матрицы корреляций; φ_{ik} - i -тый случайный вектор (поле) центрированных и нормированных исходных данных, которое подлежит разложению. Значения U_{pk} изменяются в пространстве при переходе от объекта к объекту, но не зависят от времени. Система функций U_{pk} часто представляется как функция координат (x_k, y_k) для k - того объекта и носит название базисной функции. Полученные компоненты обладают следующим свойством: любое p -е собственное значение λ_p матрицы корреляций есть дисперсия p -ой главной компоненты σ_{Zp}^2

$$\lambda_p = \sigma_{Zp}^2, \quad (3.4)$$

Тогда сумма дисперсий m компонент равна сумме собственных чисел матрицы и, следовательно, равна следу матрицы корреляций [268]

$$\sum_{p=1}^m \sigma_{Zp}^2 = \sum_{p=1}^m \lambda_p = t_R R_x = m, \quad (3.5)$$

где t_R - след матрицы корреляций.

Если разложению в базисе собственных векторов подвергнуть не корреляционную, а ковариационную матрицу, то можно показать, что сумма дисперсий главных компонент будет равна сумме дисперсий исходных рядов, т.е.

$$\sum_{p=1}^m \sigma_{Zp}^2 = \sum_{j=1}^m \sigma_{Xj}^2 \quad (3.6)$$

Такое представление позволяет более наглядно понять суть метода главных компонент, так как эти некоррелированные линейные комбинации исходных переменных отражают в себе всю дисперсию, заключённую в m переменных исходного массива данных. Несколько первых собственных чисел ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_m$) исчерпывают основную часть суммарной дисперсии поля, поэтому при анализе результатов разложения особое внимание уделяется первым собственным значениям и соответствующих им компонентам. А так как крупномасштабные процессы характеризуются большей дисперсией, то справедливо допущение, что именно они отражены в первых компонентах.

Если расположить собственные числа матрицы в убывающем порядке, то первое собственное число будет представлять собой величину

дисперсии, соответствующую первой компоненте, второе собственное число - величину дисперсии, соответствующую второй компоненте и т.д. Так как при использовании корреляционной матрицы сумма собственных чисел равна числу рассматриваемых переменных m , то разделив каждое собственное число на m или $\sum_{j=1}^m \lambda_j$, можно получить долю от суммарной дисперсии, отвечающую каждой компоненте.

Долю существенной информации по всей сумме информации о поле оценивается с помощью соотношения

$$S = \frac{\sum_{k=1}^p \lambda_k}{\sum_{s=1}^m \lambda_s}, \quad (3.7)$$

где числитель равен сумме дисперсий, приходящихся на p первых главных компонент, а знаменатель – суммарной дисперсии поля. Задаваясь значением S (например, $S=0,70-0,80$), можно установить число первых компонент, которые следует учитывать, чтобы сократить объем анализируемой информации и сохранить при этом ее основное содержание. При использовании метода главных компонент исходная информация не только замещается малым числом статистических функций, но и сохраняет в этих функциях физическую нагрузку. Полученные в результате разложения функции являются отражением реальных физических процессов, обуславливающих пространственно-временное распределение изучаемых гидрометеорологических величин.

3.2. ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЕЙ ГОДОВОГО СТОКА И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ РЕК МОЛДОВЫ И СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ УКРАИНЫ)

В качестве климатических факторов годового стока рассмотрены составляющие результирующего уравнения водно-теплового баланса водосбора за многолетний период (1.43). При этом годовые осадки характеризуют ресурсы поступающей влаги, максимально возможное испарение - теплоэнергетические ресурсы климата [136,138,139,145,288].

В исследованиях использованы ряды наблюдений за годовым стоком и осадками, а также ряды максимально возможного испарения, рассчитанные по среднемесячным температурам теплого периода в соответствии с (1.47) для территории юго-западной Украины, включая Молдову. Период совместных наблюдений составляет 27 лет (с 1954 по 1980гг.). Число рассмотренных метеорологических станций и постов больше 20. Обоснованием для выбора оптимального временного интервала послужили индексы атмосферной циркуляции $I_{\text{ш}}$ А.Л. Каца [100], которые характеризуют интенсивность и возмущенность атмосферной циркуляции. Осредненные по месяцам в интервале с 1954 по 1980 гг., эти индексы практически совпадают со среднемноголетними (1939-1990гг.), что свидетельствует о репрезентативности исходных климатических выборок. Ограниченность периода наблюдений 1954 годом продиктована отсутствием наблюдений за стоком на большинстве рек северо-западного Причерноморья до начала 50-х годов. Более того, а на территории Дунай-Днестровского междуречья из 12 только 3 ряда годового стока, имеют продолжительность превышающую 20 лет [136].

Результаты разложения полей гидрометеорологических величин (годовые осадки, максимально возможное испарение и сток) по методу естественных ортогональных функций (табл.3.1) показывают, что основная часть дисперсии (не менее 70%) этих полей описывается первыми тремя компонентами. Поскольку доля (вклад) каждой компоненты в дисперсию рассматриваемого объекта

Таблица 3.1 – Результаты разложения полей гидрометеорологических величин

Номер компоненты	Поля гидрометеорологических величин							
	Осадки X		Теплоэнергетический эквивалент Em		Слой стока Y		Слой стока Y $F \geq 1000 \text{ км}^2$	
i	λ_i	$\frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}$	λ_i	$\frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}$	λ_i	$\frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}$	λ_i	$\frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}$
1	14.53	0.56	24.13	0.93	15.25	0.64	10.75	0.67
2	2.61	0.66	0.53	0.95	3.01	0.76	1.48	0.76
3	1.95	0.73	0.44	0.97	1.59	0.83	1.32	0.85
4	1.17	0.78	0.23	0.97	0.91	0.86	0.68	0.89
5	0.87	0.81	0.19	0.98	0.71	0.89	0.56	0.92

характеризуется собственным вектором (базисной функцией), дальнейший анализ распределения каждой компоненты выполнялся на основе карт изолиний базисных функций, построенных с помощью сплайн-интерполяции. Первая компонента поля максимально возможного испарения исчерпывает 93% его суммарной дисперсии. А так как первые компоненты отражают наиболее крупномасштабные процессы, то можно заключить, что характер пространственно-временного распределения E_m обусловлен атмосферными процессами макромасштаба. Поле годовых осадков X , наоборот, в значительной степени определяется процессами более мелкого масштаба: первая компонента включает в себя лишь 56% суммарной дисперсии исходных данных. Годовой сток, связанный с двумя этими климатическими факторами, судя по вкладу первой компоненты в формирование структуры поля, занимает промежуточное положение (64%). При исключении из рассмотрения объектов с площадью меньше 1000 км^2 , вклад первой компоненты в дисперсию поля годового стока возрастает до 67%. Дело в том, что на малых водосборах увеличивается влияние факторов подстилающей поверхности, которые соответствуют мезо- и микромасштабу.

Для всех изучаемых полей величины и характер распределения изолиний базисных функций являются сходными (рис.3.1а-3.1г), что свидетельствует о едином физическом процессе, формирующем эти поля. Знак первой базисной функции не изменяется, указывая на однородность одного и того же процесса на всей исследуемой территории. Именно первый по значимости крупномасштабный процесс обеспечивает синхронность многолетних колебаний максимально возможного испарения, стока и осадков. Минимум U_{1,E_m} находится на северо-западе. При разложении поля годовых осадков весовой коэффициент первой компоненты снижается на объектах Дунай-Днестровского междуречья до 0,13 (рис.3.1а). Уменьшение значений на каком-либо участке периферии означает, что в его пределах большее влияние имеют региональные особенности. Вследствие недостатка данных по стоку, информация о распределении первой базисной функции в пределах междуречий Дунай-Днестр и Днестр-Южный Буг отсутствует (рис.3.1в), а при исключении малых и средних водосборов утрачиваются сведения об U_1 и для западной части Молдовы (рис.3.1г). Тем не менее, согласованность в распределении первой базисной функции стока и осадков хорошо выражена (коэффициент корреляции равен 0,65). Максимальные значения U_1 для всех полей сосредоточены в среднем течении Южного Буга, и уменьшение значений первой базисной функции происходит от центра к периферии, причем для максимально возможного испарения эти изменения невелики: в интервале от 0.22 до 0.18 (рис.3.1б).

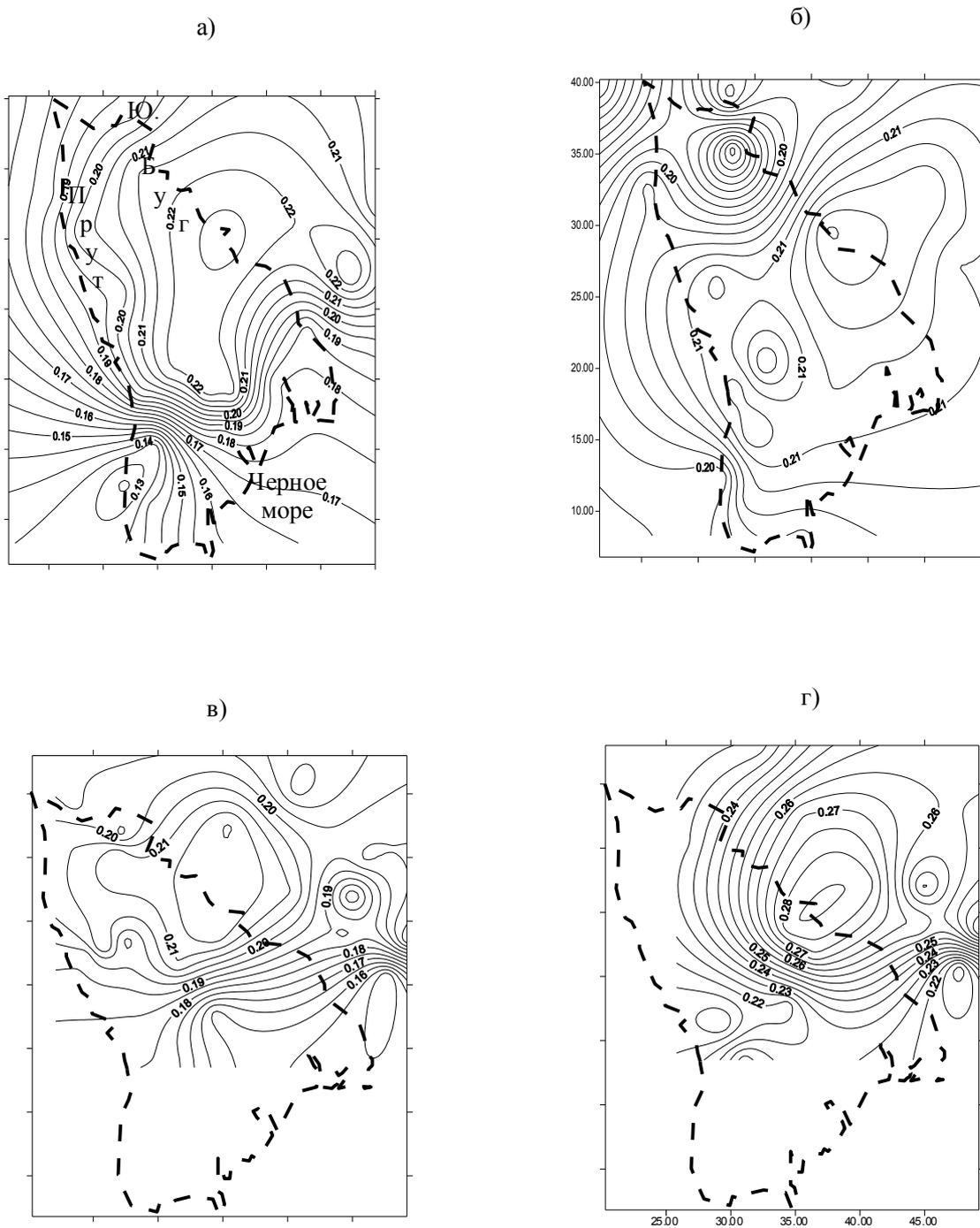


Рис.3.1 Первая базисная функция полей гидрометеорологических величин
 а) осадки X ; б) максимально возможное испарение E_m ;
 в) годовой сток Y с использованием данных по всем водосборам;
 г) годовой сток Y с использованием данных по водосборам
 с площадью большей или равной 1000км.кв.
 (- - - граница выделенной территории)

Вторая компонента, соответствующая физическим процессам меньшего масштаба, описывает 10% дисперсии поля годовых осадков, 2% дисперсии поля максимально возможного испарения и 12% дисперсии поля годового стока (в случае привлечения к расчетам исходных выборок только крупных водосборов доля учитываемой дисперсии уменьшается до 9%). Вторая базисная функция имеет хорошо выраженный меридиональный характер распределения (рис.3.2). В отличие от первой базисной функции она знакопеременна. В физическом плане это должно означать, что колебания рассматриваемых гидрометеорологических характеристик в западной и восточной частях региона находятся в противофазе [216]. Другими словами, для второго по масштабности реального физического процесса характерна асинхронность в многолетних колебаниях X, E_m, Y . Положение нулевой изолинии $U_2 = 0$ в таком случае можно рассматривать в качестве границы районов с синхронными колебаниями той или иной величины. Нулевая изолиния $U_{2,X}$ поля осадков делит исследуемую территорию примерно на две равные площади (рис.3.2а), в то время как U_{2,E_m} смещается в районе Дунай-Днестровского междуречья к западу, увеличивая площадь восточного района (рис. 3.2б). Соотношение этих площадей для поля стока, по-видимому, должно занять промежуточное положение. К сожалению, отсутствие данных по годовому стоку в южной части территории не позволяет однозначно ответить на этот вопрос. Вместе с тем, исследования синхронности колебаний годового стока рек Молдовы и Дунай-Днестровского междуречья, выполненные в [136], для более коротких временных рядов, подтверждают принадлежность водотоков Дунай-Днестровского междуречья к восточному району, что в принципе следует из анализа рис. 3.2 в. Вторая базисная функция стока достаточно тесно связана как с U_{2,E_m} , так и с $U_{2,X}$: коэффициенты корреляции соответственно равны $-0,84$ и $-0,76$.

Вклад третьей компоненты в суммарную дисперсию поля годовых осадков и стока составляет соответственно 7% и 7-9%, соответственно, а в дисперсию поля максимально возможного испарения - 2%. В отличие от первых двух, третьей компоненты исходных полей годовых осадков и максимально возможного испарения существенно различаются между собой (рис.3.3). Так, если нулевая изолиния третьей базисной функции осадков $U_{3,X}$ отделяет север и северо-запад от юга и юго-востока (рис.3.3а), в то время как разнознаковые центры U_{3,E_m} сосредоточены на юго-западе и северо-востоке (рис.3.3б).

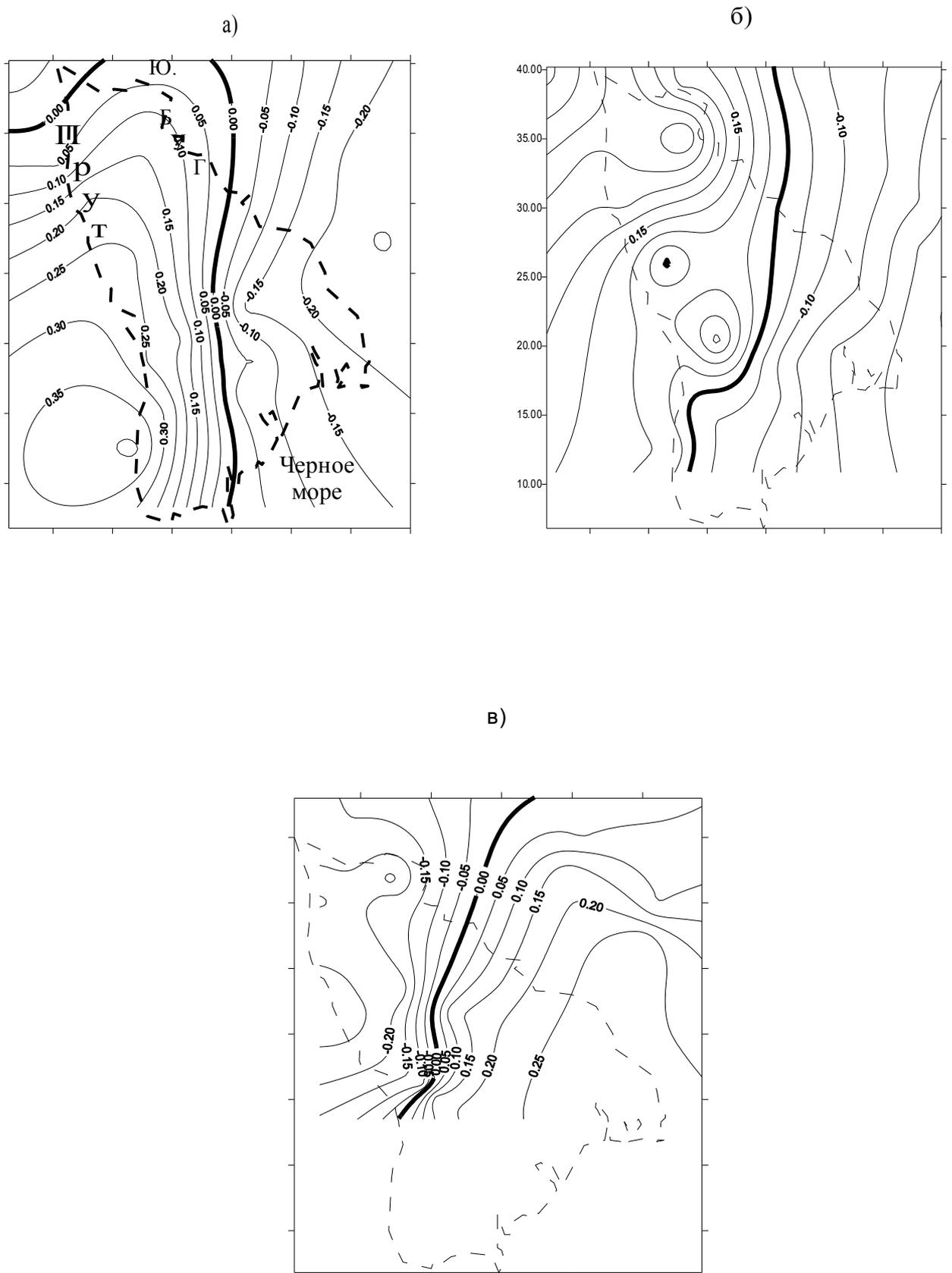


Рис. 3.2 Вторая базисная функция полей гидрометеорологических величин
 а) осадки X ; б) максимально возможное испарение E_m ;
 в) годовой сток Y
 (- - - граница выделенной территории)

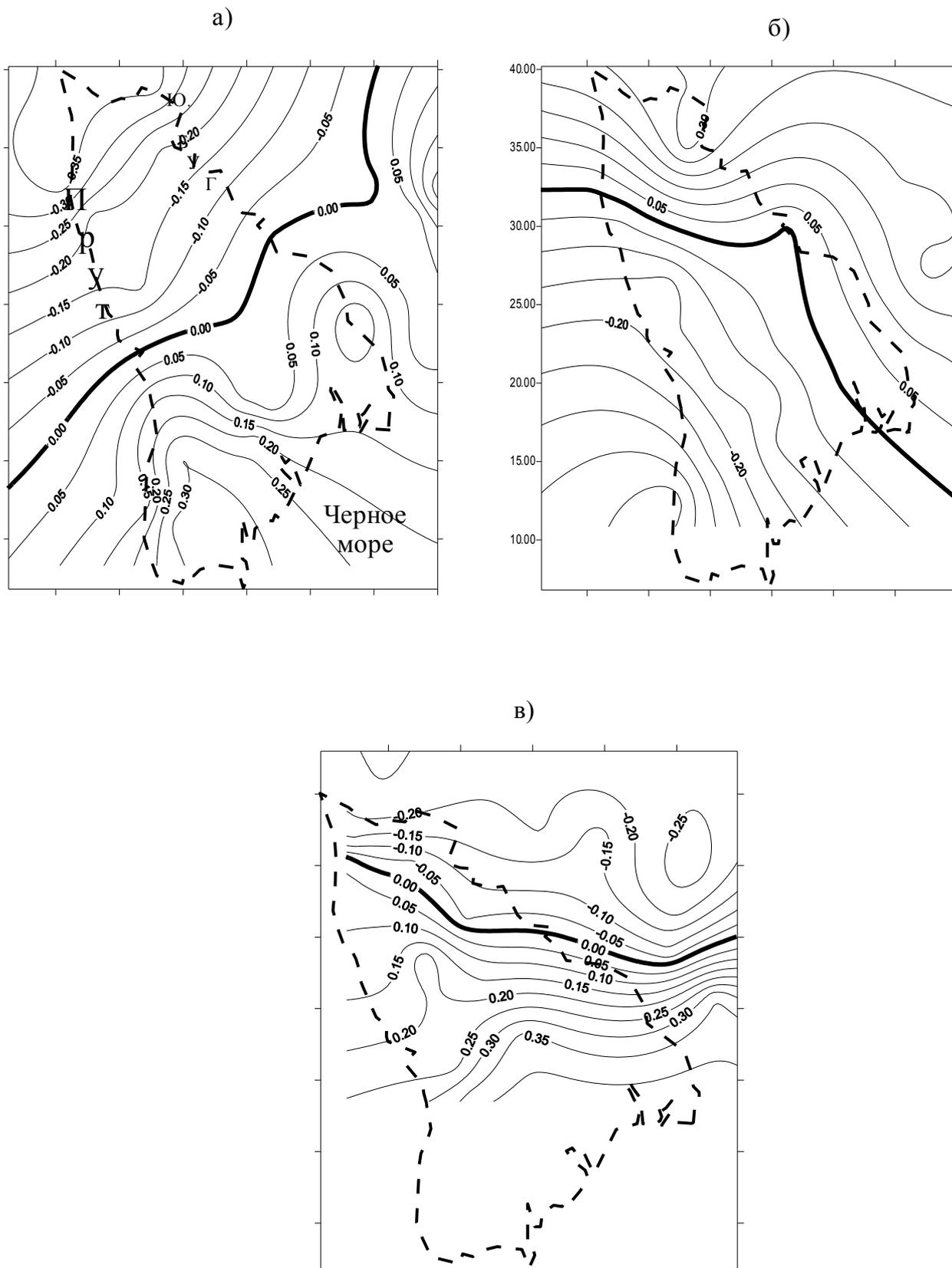


Рис.3.3 Третья базисная функция полей гидрометеорологических величин
 а) осадки X ; б) максимально возможное испарение E_m ;
 в) годовой сток Y
 (- - - граница выделенной территории)

Очевидно, что это обусловлено различными процессами мезомасштаба, формирующими поле осадков и максимально возможного испарения. Если предположить, что годовой сток формируется в результате взаимодействия осадков и максимально возможного испарения и на уровне мезомасштабных процессов, а об этом свидетельствуют тесные корреляционные связи между третьими базисными функциями (коэффициент корреляции между $U_{3,Y}$ и $U_{3,Em}$ равен (-0,83), а между $U_{3,Y}$ и $U_{3,X}$ - (+0,74), то должна происходить компенсация таких воздействий и нулевая изолиния третьей базисной функции пройдет квазизонально, разделяя северную и южную подобласти, что и видно из рис.3.3в.

В результате совместного анализа полей годовых осадков, максимально возможного испарения и годового стока, выполненного при помощи метода главных компонент, показано, что первые компоненты описывают более 70% суммарной дисперсии исходных рядов. Базисные функции отражают процессы различных масштабов. Сравнительный анализ полей базисных функций позволяет судить о вкладе климатических факторов в механизм формирования полей годового стока. Остается внести некоторую ясность в физическую интерпретацию упомянутых процессов, хотя это сделать весьма сложно, поскольку связь между рядами натуральных измерений и их аналогами в классе базисных функций отсутствует. Тем не менее, в практике гидрометеорологических приложений компонентного анализа такие попытки существуют [97,216,282].

Класс первых базисных функций отображает наиболее крупномасштабные атмосферные процессы планетарного масштаба и, в первую очередь, обусловленный ими характер зональной циркуляции. Как уже отмечалось, в формировании последней определяющую роль играют так называемые постоянные центры действия атмосферы - Исландский минимум и Азорский максимум. От их сезонной миграции и интенсивности зависит, в основном, климатический фон осадков, температуры и стока на территории всей Европы, включая и Украину. Ввиду того, что речь идет о крупномасштабном процессе, его "нагрузка" на отдельные объекты практически не изменяется в пределах исследуемой территории. Это особенно хорошо выражено в распределении первой базисной функции поля максимально возможного испарения. Поскольку температурный фон является более "консервативной" величиной, чем осадки, зональная циркуляция на 93% определяет пространственно-временное распределение максимально возможного испарения, и на 56-67% - распределение осадков и стока [138].

Класс вторых базисных функций включает в себе информацию об атмосферных процессах меньшего масштаба, чем планетарные. Логично предположить, что это процессы синоптического масштаба, обуславливающие в годовом ходе гидрометеорологических характеристик сезонные особенности циклонической и антициклонической деятельности над Украиной. С точки зрения условий формирования годового стока, особый интерес представляет циклоническая деятельность, связанная с осадкоформирующими процессами [11,14,22,23,30,41,122,270]. В таком случае имеет смысл рассмотреть северо-западные и южные циклоны, повторяемость которых в сумме превышает повторяемость западных циклонов. В холодное полугодие (октябрь-март), когда повторяемость южных циклонов особенно велика [23,234], относительно теплые и значительно увлажненные воздушные массы, сформировавшиеся над акваториями Средиземного и Черного морей, перемещаются по квазимеридиональным траекториям через территорию Украины. Перемещение северо-западных циклонов в пределах рассматриваемой территории связано с меньшими запасами влаги по сравнению с южными циклонами при относительно однородном температурном фоне.

В теплый период (апрель-сентябрь), наоборот, над территорией Украины преобладает антициклональная без осадков погода с высоким температурным фоном [103]. Таким образом, стокоформирование на территории Украины носит явно выраженный сезонный характер. При этом в холодное полугодие определяющую роль играют осадки, а в теплое - теплоэнергетические ресурсы.

Следовательно, именно процессы синоптического масштаба обеспечивают существование двух почти равноправных по воздействию климатических факторов формирования годового стока: осадков и максимально возможного испарения. Данный вывод хорошо согласуется с пространственным распределением третьей базисной функции полей осадков и максимально возможного испарения, с одной стороны, и полей стока - с другой.

Третий по значимости процесс, описываемый базисными функциями U_{i3} , логично было бы отождествить с мезомасштабными атмосферными процессами. Таковыми могут быть локальные циркуляции, которые для исследуемой равнинной территории адекватны бризовой. Однако в механизме формирования климатического фона осадков, максимально возможного испарения и стока едва ли можно ожидать существенного вклада этого вида локальной циркуляции, основу которой составляют температурные контрасты между сушей и морем. Более того, "глубина" проникновения морского бриза не превышает 30-50 км. Исходя из этого, можно предположить, что пространственное распределение третьей базисной функции вызвано особенностями распределения осадков и

температур, обусловленными не циклонической деятельностью, а трансформацией воздушных масс на обширных равнинных территориях.

Исследование четвертой базисной функции показало, что связей между пространственными распределениями годового стока и климатических факторов на уровне четвертой компоненты не существует.

3.3. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РЯДОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ГОДОВОГО СТОКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАЗЛОЖЕНИЯ

В параграфе 3.1 были изложены теоретические основы решения задачи “сжатия” исходной информации при помощи метода главных компонент и в 3.2 дан пример использования результатов этого сжатия для исследования взаимосвязей в структуре полей осадков, максимально возможного испарения и стока. Показано, что структура полей годового стока связана со структурой полей метеорологических факторов - годовых осадков и максимально возможного испарения – на уровне первых трех компонент разложения, описывающих более 70% исходных данных. Отсюда нами сделан вывод об обусловленности первых трех компонент разложения полей гидрометеорологических величин одними и теми же физическими процессами различных масштабов, которые интерпретировались как атмосферные.

Как известно, метеорологические поля формируются под действием атмосферных процессов различного масштаба [267,268,297]: макропроцессов, связанных с планетарными движениями масс воздуха; процессов, обусловленных атмосферной циркуляцией (синоптическими процессами); процессов мезо- и микромасштаба, а также мелкомасштабных флуктуаций, связанных с погрешностями измерений и первичной обработкой результатов наблюдений. При необходимости исключить влияние малоинформативных физических процессов на формирование гидрометеорологических полей используют математический аппарат, уже изложенный в 3.1, совершая обратный переход от компонент к значениям наблюдаемой величины.

Любой элемент матрицы исходных наблюдаемых значений φ_{ij} (на i -том рассматриваемом объекте в j -тый момент времени) может быть рассчитан, если проблема собственных векторов решена

$$\varphi_{ij} = \sum_{k=1}^m U_{ki} z_{kj}, \text{ при } i = 1, m; j = 1, n \quad (3.8)$$

где φ_{ij} - составляющие j -того случайного вектора (поля) центрированных и нормированных исходных данных, которое подлежит разложению;

U_{ki} - весовые коэффициенты, отражающие вклад i -того объекта в каждую k -тую компоненту или составляющие собственных векторов матрицы корреляций; z_{kj} - составляющие k -той компоненты разложения;

m - число объектов;

n - длина исходных рядов.

Значения U_{ki} изменяются в пространстве при переходе от объекта к объекту, но не зависят от времени. Система функций U_{ki} часто представляется как функция координат (x_i, y_i) для i -того объекта

$$U_{ki} = f(x_i, y_i) = U_k(x_i, y_i) \quad (3.9)$$

Составляющие вектора-строки матрицы Z $[z_{k1} \ z_{k2} \ \dots \ z_{kp} \ \dots \ z_{kn}]$ могут быть представлены как функция времени (амплитудная функция) и являются общими для всех объектов [282]

$$z_{kj} = f(t) = z_k(t) \quad (3.10)$$

В связи с вышеизложенным, формула (3.8) может быть представлена в виде

$$\varphi(x, y, t) = \sum_{k=1}^m U_k(x, y) z_k(t), \quad (3.11)$$

При рассмотрении только первых компонент разложения, в которых содержится основная часть информации, заключенная в исходных полях, выражение (3.8) преобразуется к виду

$$\varphi_{ij} = \sum_{k=1}^p U_{ki} z_{kj}, \text{ при } i = 1, m; j = 1, n \quad (3.12)$$

где p - число первых компонент.

Переход от результатов разложения к отфильтрованным данным \tilde{x}_{ij} осуществляется по выражению

$$\tilde{x}_{ij} = \bar{x}_i + \sigma_i \sum_{k=1}^p U_{ki} z_{kj} + \varepsilon; \text{ при } i = 1, m; j = 1, n \quad (3.13)$$

или

$$\tilde{x}_{ij} = \bar{x}_i + \sum_{k=1}^p w_{ki} z_{kj} + \varepsilon; \text{ при } i = 1, m; j = 1, n, \quad (3.14)$$

где \bar{x}_i - среднее арифметическое значение исходного ряда;

σ_i - среднее квадратическое отклонение исходного ряда;

w_{ki} - весовые коэффициенты амплитудной функции (компоненты), являющиеся составляющими собственного вектора разложения матрицы ковариаций;

ε - случайная ошибка, вызванная сокращением числа компонент.

Прикладное применение выражения (3.14) носит название “фильтрации” исходных данных и позволяет представить процесс в виде искусственного хронологического ряда, который отражает свойства только тех компонент, а, следовательно, и соответствующих им физических процессов различных масштабов, которые были введены в (3.14). При этом используются амплитудные функции (компоненты) и весовые коэффициенты (значения собственных векторов матрицы корреляций) первых составляющих разложения, а также среднемноголетние величины \bar{x}_i . Полученный хронологический ряд является сглаженным, так как не учитывает влияние на формирование исследуемой величины процессов более мелкого масштаба. Чтобы использовать (3.14) в гидрологических расчетах, необходимо установить физическое содержание входящих в него величин и функций.

Как уже отмечалось, распределение весовых коэффициентов U_{ki} и w_{ki} (базисных функций) в пространстве является детерминированным. Каждый из коэффициентов w_{ki} показывает вклад k -той компоненты разложения, а, следовательно, и соответствующего ему физического процесса в дисперсию данных i -того объекта. Общие закономерности пространственного распределения коэффициентов w_{ki} , полученные для годового стока, в основном, аналогичны распределению U_{ki} (рис.3.4), за исключением первой компоненты. Кроме того, при использовании ковариационных матриц происходит некоторое перераспределение дисперсий между компонентами по сравнению с данными, приведенными в табл.3.1. Так, на первую составляющую разложения полей годового стока

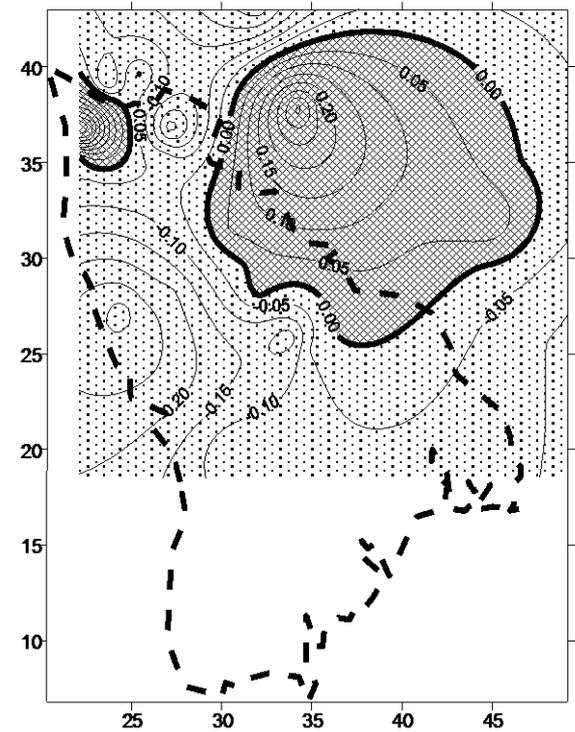
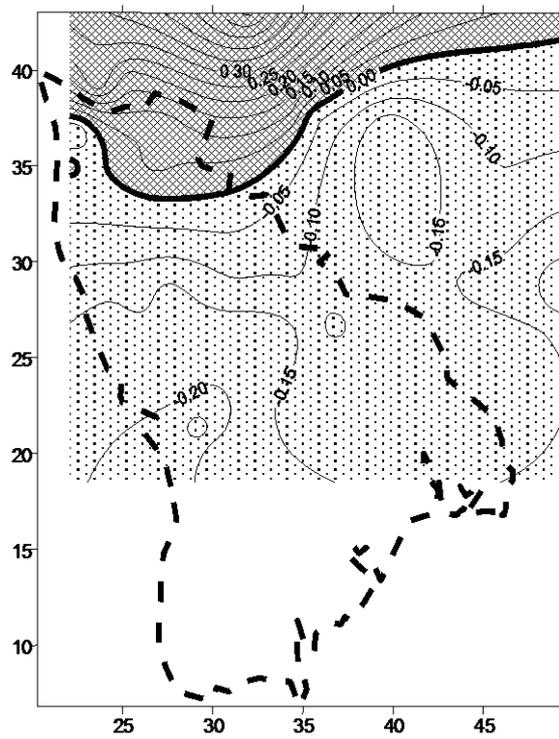
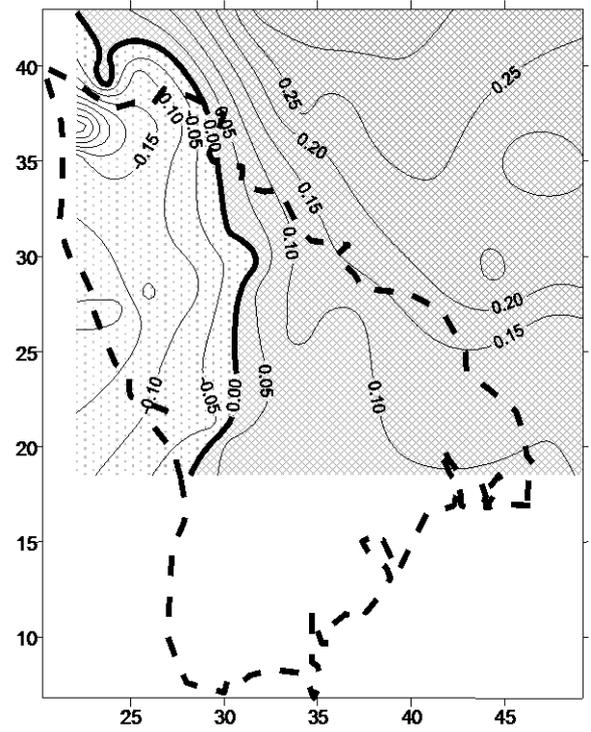
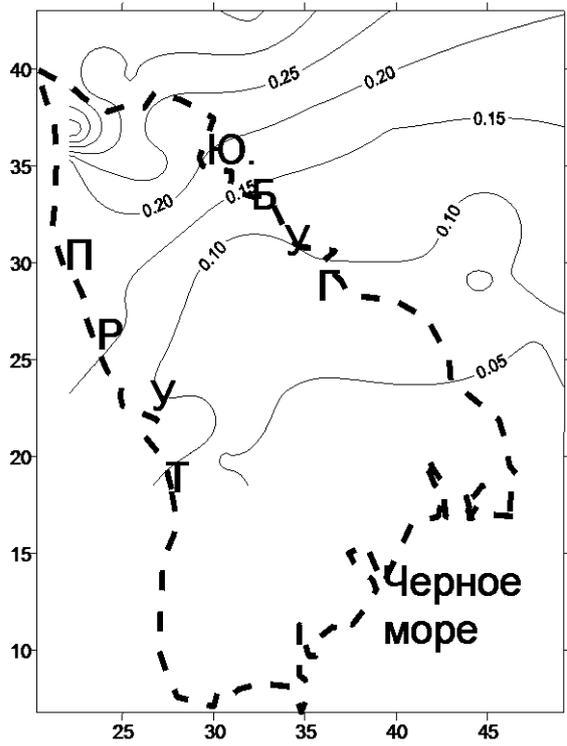


Рис.3.4 Пространственное распределение весовых коэффициентов первых четырех составляющих разложения матрицы ковариаций по естественным ортогональным функциям

приходится 69% суммарной дисперсии, на вторую – 9%, третью – 6%, четвертую – 3%, пятую – 2%.

Параметризация полей годового стока в виде весовых коэффициентов w_{ki} позволяет установить связи с различными показателями стокоформирующих факторов, как климатических, так и отражающих особенности подстилающей поверхности.

Для территории юго-западной Украины и Молдовы получены следующие зависимости весовых коэффициентов w_{ki} разложения полей годового стока от координат центров тяжести водосборов

$$w_{1i} = 0,0115y_i - 0,00510x_i - 0,0365; R = 0,815 \quad (3.15)$$

$$w_{2i} = 0,0172x_i - 0,519; r = 0,740 \quad (3.16)$$

$$w_{3i} = 0,0190y_i - 0,667; r = 0,726, \quad (3.17)$$

где w_{1i}, w_{2i}, w_{3i} - весовые коэффициенты первой, второй и третьей амплитудной функции, соответственно; x, y - условные координаты долготы и широты центров тяжести водосборов; r - коэффициент парной корреляции; R - коэффициент множественной регрессии.

На пространственное распределение весовых коэффициентов четвертой составляющей разложения полей годового стока оказывают влияние такие показатели факторов подстилающей поверхности как средняя высота водосбора H_{CP} и заболоченность f_B

$$w_{4i} = 0.00250H_{CP,i} - 0.0558f_{Bi} + 0,0104x_i + 0.00470y_i - 0.982; R = 0.770, \quad (3.18)$$

что говорит о связи четвертой компоненты с физическими процессами мезо- и микромасштаба.

Между пространственным распределением весовых коэффициентов разложения полей годовых осадков, максимально возможного испарения и стока также существуют связи, которые могут быть представлены в виде следующих эмпирических зависимостей

$$w_{1i} = -0,000884\bar{E}_{mi} + 0,000361\bar{X}_i + 0,660; R = 0,884 \quad (3.19)$$

$$w_{2i} = -0,00150\bar{E}_{mi} - 0,00290\bar{X}_i + 3,014; R = 0,734 \quad (3.20)$$

$$w_{3i} = 0,00180\bar{E}_{mi} + 1,450; r = -0,788, \quad (3.21)$$

где \bar{E}_{mi} - годовая норма максимально возможного испарения для i - того объекта; \bar{X}_i - годовая норма осадков для i - того объекта.

Полученные результаты подтверждают вывод, что структура полей годового стока определяется, главным образом, климатическими факторами, а влияние факторов подстилающей поверхности находит свое отражение в составляющих разложения более мелкого масштаба (в данном случае - в четвертой составляющей разложения), антропогенные же воздействия проявляются на уровне пятой составляющей. Установлено, что наибольшие значения весовых коэффициентов пятой компоненты разложения соответствуют водосборам с существенно нарушенной хозяйственной деятельностью хронологическим ходом годового стока, например, водосбор р.Бык – г.Кишинев.

Помимо исследования закономерностей пространственного распределения весовых нагрузок на первые составляющие разложения нами были проанализированы амплитудные функции z_{kj} . Установлено, что амплитудная функция первой составляющей разложения отражает основные закономерности колебаний годового стока в рассматриваемом регионе (рис. 3.5). Она указывает на устойчивый переход водности из маловодной в многоводную фазу, начиная с 1969 года. Распределение первой амплитудной функции во времени можно интерпретировать как осредненное по территории колебание стока, обусловленное процессами глобального масштаба.

На уровне второй составляющей разложения хорошо выражено некоторое снижение стока, наблюдавшееся на фоне фазы повышенной водности в период с 1971 по 1976 гг. Третья амплитудная функция отражает всплески и подъемы в колебаниях годового стока, вызванные процессами несиноптического масштаба.

Используя первые три составляющих разложения (амплитудные функции и весовые коэффициенты), при помощи уравнения (3.14) можно получить (восстановить) хронологические ряды, в которых будут отражены особенности колебаний годового стока, обусловленные климатическими факторами. Посредством привлечения к восстановлению стока четвертой компоненты могут быть учтены и факторы подстилающей поверхности, что особенно важно для малых водосборов. Таким образом, рассчитанные по первым трем (3.15–3.17) или четырем (3.18) компонентам ряды годового стока могут быть отождествлены с естественным стоком (рис. 3.6) рек. Антропогенное влияние при этом восстановлении “отсекается” за счет фильтрации исходной информации. Точность расчета значений естественного годового стока по (3.14) находится в пределах $\pm 10,0\%$.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что процедура фильтрации может быть использована для восстановления

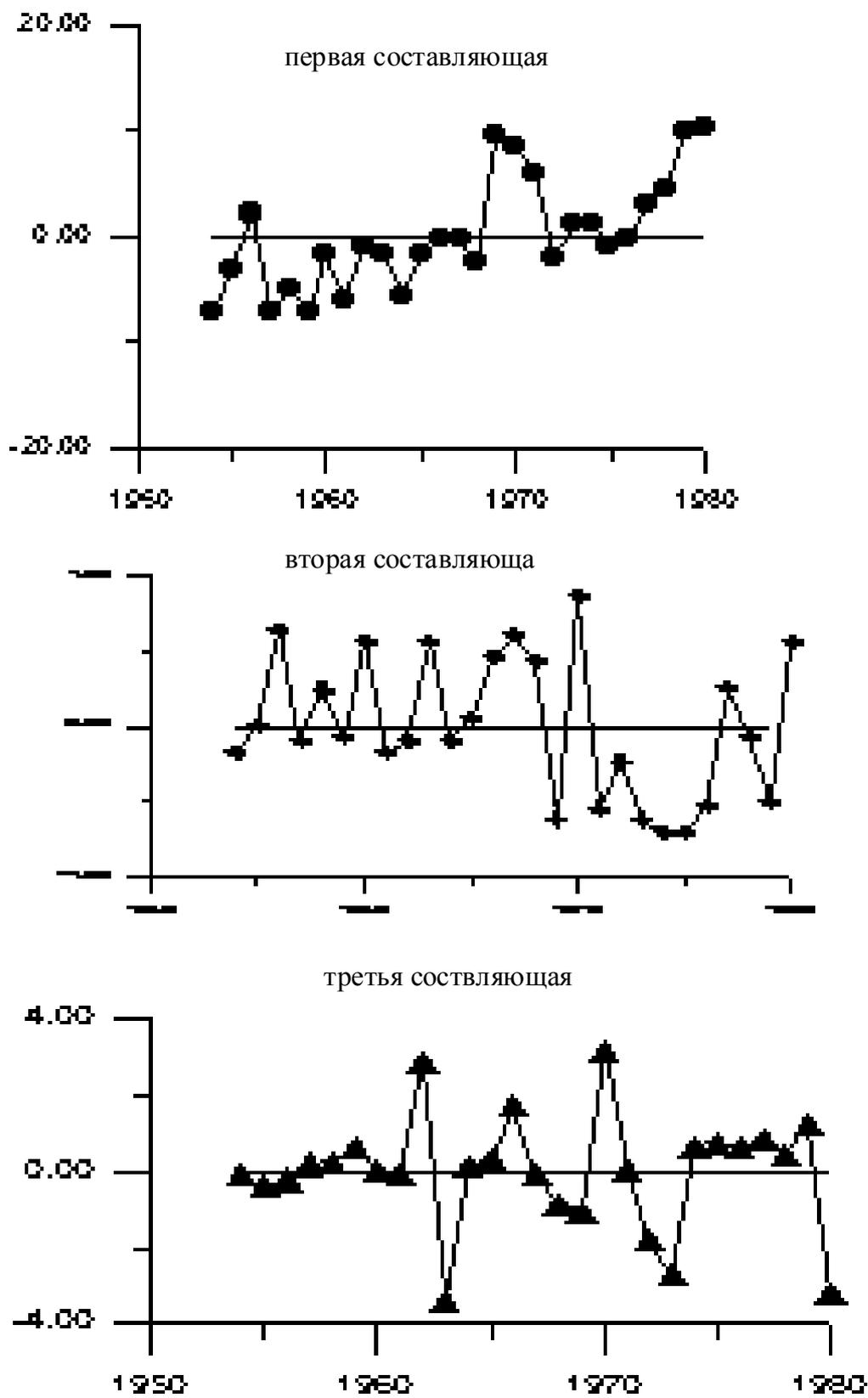


Рис.3.5 Первые три амплитудные функции разложения полей годового стока (юго-западная Украина и Молдова)

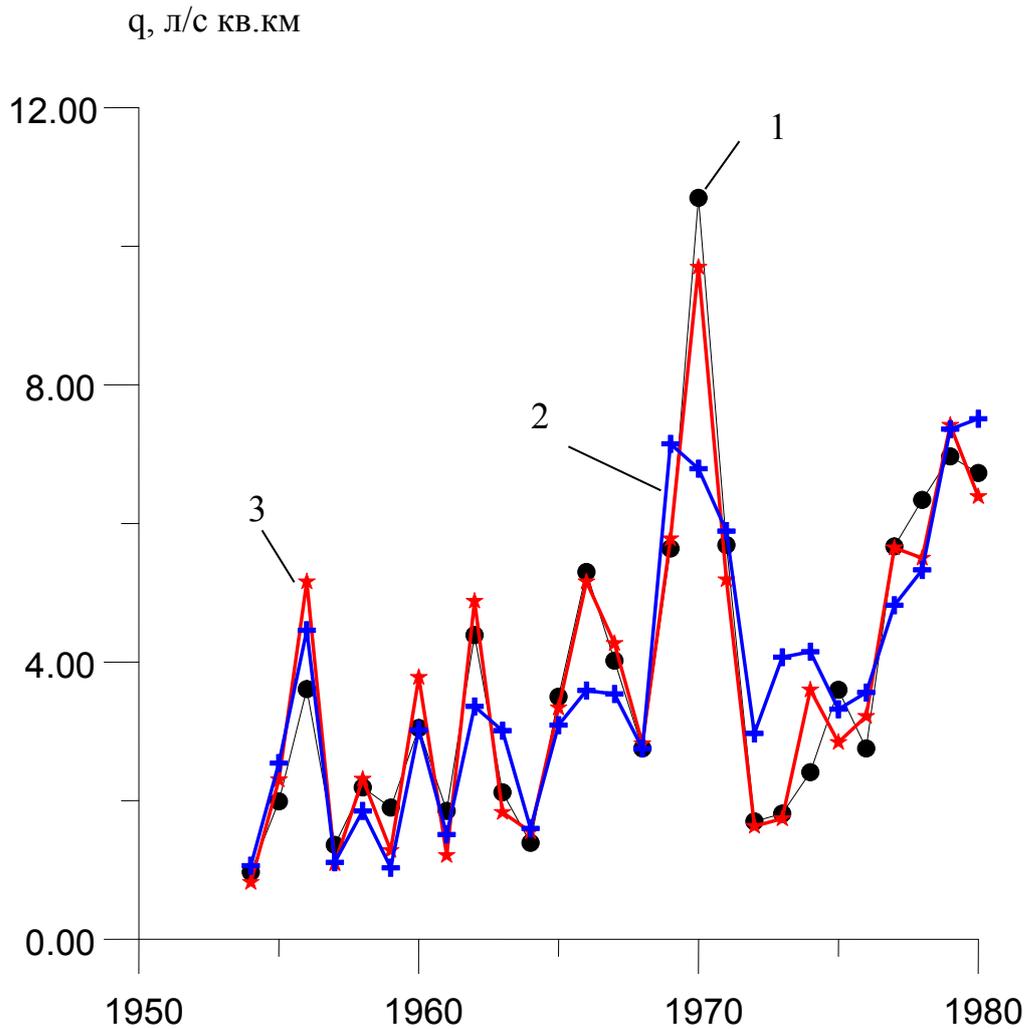


Рис.3.6 – Хронологический ход годового стока реки Тетерев-с.Макалевичи:

1 – наблюдаемого 2 – восстановленного по первой компоненте, 3 – восстановленного по первым трем компонентам

естественного (ненарушенного хозяйственной деятельностью стока рек). Именно таким образом были восстановлены хронологические ряды годового естественного стока Дунай-Днестровского междуречья [145,142].

Как уже отмечалось, амплитудные функции z_{kj} , полученные по данным всей юго-западной Украины и Молдовы, являются общими для всей территории и не зависят от координат центров тяжести водосборов.. А оценка весовых коэффициентов для каждого водосбора может быть осуществлена по приведенным выше эмпирическим уравнениям вида (3.15–3.17) или (3.19-3.21).

Основной проблемой при моделировании по (3.14) является определение среднего арифметического значения \bar{x}_i годового стока в естественных условиях его формирования. С этой целью нами была использована карта норм климатического стока (см. рис. 1.5), а также переходные коэффициенты (2.9,2.10), учитывающие влияние факторов подстилающей поверхности.

В качестве примера на рис. 3.7 приведено моделирование ряда естественного стока для водосбора р.Когильник – г. Котовск (точность расчета при моделировании снижается до $\pm 15,0\%$). Недостатком предложенного подхода к расчетам естественного годового стока является то, что расчетный период ограничен длительностью рядов наблюдений, используемых для оценке амплитудных функций, т.е. в данном случае – периодом с 1954 по 1980 гг.

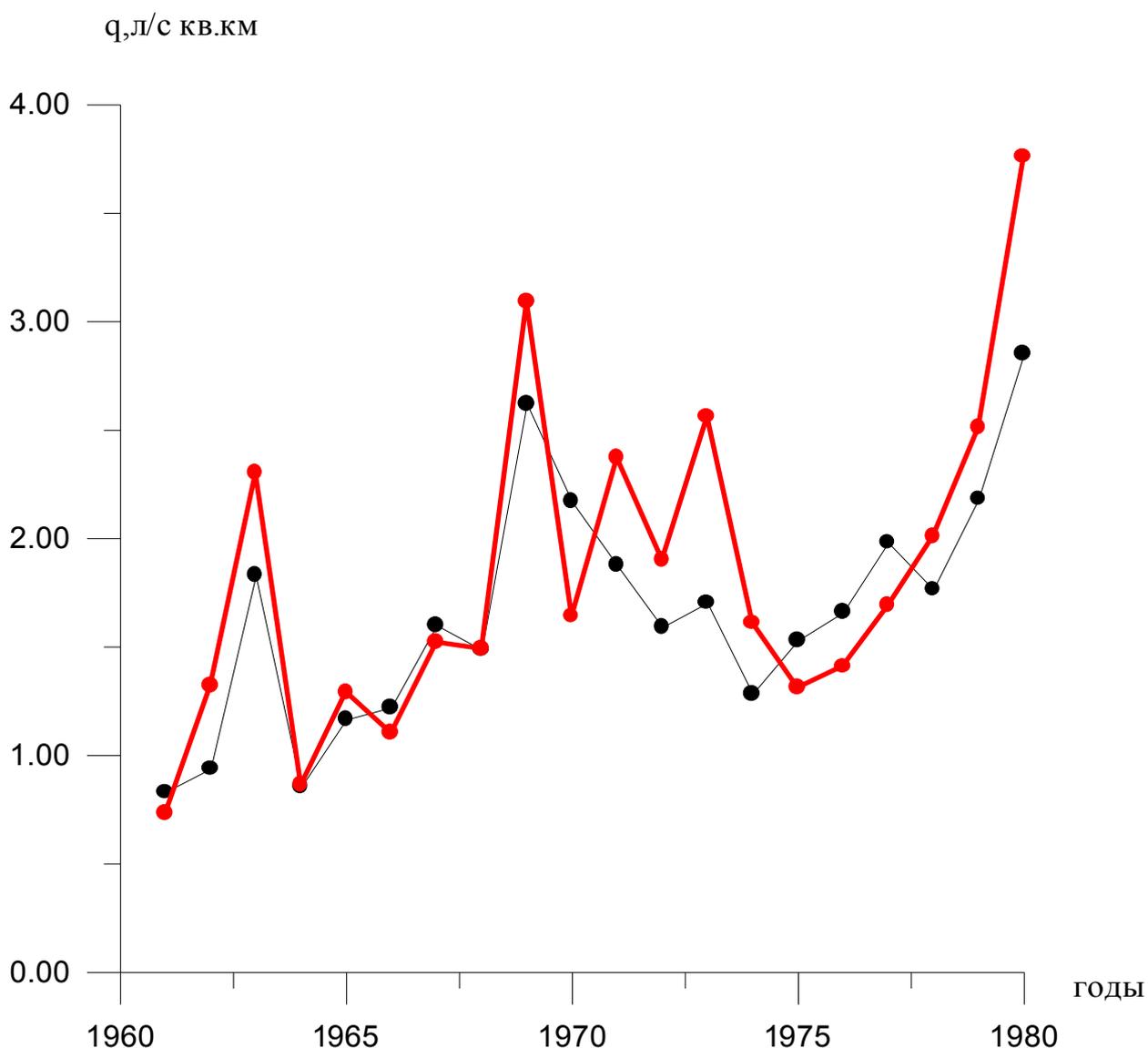


Рис. 3.7 Сравнение наблюдаемого годового стока и восстановленного на основе метода главных компонент (использованы данные по первым трем компонентам разложения) р. Когильник - г. Котовск

РАЗДЕЛ 4

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОБОБЩЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОДОВОГО СТОКА РЕК УКРАИНЫ

4.1. ПРОБЛЕМЫ И СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДА ГЕОГРАФО- ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ОБОБЩЕНИЙ

Метод географо-гидрологических обобщений используют при недостаточной гидрологической изученности расчетного водосбора или при отсутствии данных наблюдений [158,181]. Географо-гидрологические исследования направлены на характеристику осредненных (на разном пространственно-временном уровне) условий формирования стока. При этом привлекаются данные с других водосборов, на которые распространяется условие сходства особенностей формирования стока и подстилающей поверхности. Для оценки статистических параметров стока неизученных, с точки зрения измерений стока, водосборов разрабатываются расчетные карты изолиний, районов. Для учета факторов подстилающей поверхности, как правило, строятся эмпирические зависимости, связывающие характеристики речного стока с количественными показателями этих факторов. Факторы стока традиционно делятся на зональные, азональные и интразональные (местные) [16,17,49,217,218]. Связанные с климатом зональные факторы обуславливают плавное и непрерывное изменение характеристик стока, пространственное обобщение которых представляется в виде карт изолиний. Интразональные и азональные факторы вызывают дискретность пространственного распределения характеристик стока [82], которая при пространственном обобщении находит свое выражение в районировании территории, т.е. выделении участков, в пределах которых зональные различия невелики, что и позволяет принять единое значение расчетного параметра или описать его единой расчетной зависимостью. Азональные факторы связаны с размером, формой и структурой конкретных водосборов и не зависят от географического положения водосбора. Влияние азональных факторов устраняется с помощью поправочных коэффициентов к порайонным или снятым с карты изолиний значениям, в отдельных случаях эти коэффициенты могут быть представлены в виде региональных зависимостей от морфометрических характеристик водосборов. В данной работе примером могут быть зависимости

переходных коэффициентов от норм климатического стока к естественному (см. раздел 2).

Основы метода географо-гидрологических обобщений заложены В.Г. Глушковым [57] и получили свое дальнейшее развитие в работах А.Н.Бефани [16], П.С. Кузина и В.И. Бабкина [124], С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля [120], А.В. Рождественского [185,200], Г.П. Калинина [96], А.В. Христофорова [251] и др.

Первые схемы районирования территории Украины приводятся в работах В. Докучаева, Л. Берга, опубликованные в конце XIX – в начале XX столетий. На современном этапе следует отметить работы А.Маринича, А. Ланько, П. Шищенко, Г. Миллера.

Основные задачи метода географического обобщения можно сформулировать следующим образом [251,252].

1. Выяснение целесообразности географических обобщений.
2. Выяснение степени географического обобщения.
3. Выбор способа географических обобщений.
4. Оценка пределов географического обобщения.
5. Поиск целесообразных и обоснованных форм описания пространственного распределения обобщаемых параметров речного стока (проблема картографирования [228]).

Выбор метода картографирования характеристик стока связан с проблемой соотношения между влиянием зональных и азональных факторов. В тех случаях, когда роль зональных факторов преобладает, применяется принцип географической интерполяции и строится карта изолиний. При использовании метода районирования предполагается, что в пределах выделенного района наблюдается относительная однородность стокоформирующих факторов. При гидрологическом районировании следует учитывать масштаб районирования, так как такие таксономические единицы, как физико-географический пояс, страна, зона, провинция, подзона не всегда находят свое отражение в масштабах гидрологических районов. Дело в том, что гидрологическое районирование чаще всего опирается на преобладающее влияние какого-либо одного фактора формирования стока, в то время как в физико-географическом районировании преобладает принцип комплексности или ландшафтно – генетический принцип [57,252].

В настоящее время широко используются новые вероятностно-статистические показатели, эффективные способы анализа и синтеза явлений, оценки надежности и устойчивости географических

обобщений, которые в данной работе применены к параметрам годового стока рек Украины.

4.2. ОБОСНОВАНИЕ РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ ПО СИНХРОННОСТИ КОЛЕБАНИЙ ГОДОВОГО СТОКА

Изучение закономерностей колебаний стока во времени и пространстве является одним из весьма важных вопросов гидрологии, так как позволяет совершенствовать методы гидрологических и водохозяйственных расчетов. При этом первая задача географического обобщения состоит в установлении синхронности колебаний годового стока. Практическая значимость этой проблемы тесно связана с решением таких задач, как переброска стока, водоснабжение, обеспечение судоходства и т.п. Особенности закономерностей синхронности (синфазности) колебаний годового стока рек Украины изучены недостаточно.

4.2.1. Современное состояние вопроса о районировании годового стока рек Украины по характеру его колебаний. Синхронными называют колебания стока рек, на которых наблюдается одинаковый ход водности отдельных лет, а асинхронными - колебания стока, имеющие противоположный ход водности. Под синфазностью и асинфазностью стока понимается одинаковый или противоположный ход колебаний водности не отдельных лет, а целых групп.

С целью исследования синхронности колебаний годового стока рек бывшего Советского Союза П.С. Кузин и В.И. Бабкин [124] рассмотрели нормированные разностные интегральные кривые для годового, половодного и меженного стока 200 опорных створов средних рек. При исследовании зональных изменений многоводных и маловодных фаз стока были использованы данные по водосборам, расположенным вдоль 12 меридиональных профилей, а при исследовании внутризональных изменений - вдоль 6 широтных профилей.

Главные закономерности изменения показателей маловодных и многоводных фаз стока равнинных рек прослеживаются в меридиональном и широтном направлениях во всех природных зонах: модульные коэффициенты маловодных фаз стока в направлении с севера на юг обычно уменьшаются, а их обеспеченность увеличивается; модульные коэффициенты многоводных фаз, наоборот, с севера на юг обычно увеличиваются, а их обеспеченность уменьшается; зональные изменения (с севера на юг) модульных коэффициентов и обеспеченностей маловодных и многоводных фаз стока имеют довольно плавный характер;

внутризональные изменения (с запада на восток) модульных коэффициентов и обеспеченностей маловодных и многоводных фаз стока имеют скачкообразный характер, т.е. тенденцию к смене противоположной водности.

Несмотря на разнообразие количественных показателей фаз водности были выделены районы со сходным характером циклических колебаний стока. Районирование территории по однородности (синфазности) циклических колебаний стока было выполнено по трем вариантам: для годового и половодного стока, а также для меженного стока. Из этого районирования следует, что вся Украина, за исключением р. Северский Донец, расположена в пределах одного района с синфазными колебаниями годового стока и стока половодий. В работах П.С. Кузина и В.И. Бабкина [123,124] отмечается, что районирование обусловлено направлением главнейших воздушных течений. Там же указывается, что эти границы устойчивы, потому что для нарушения синфазности стока необходимы коренные изменения в динамике атмосферной циркуляции, что может случиться только в связи с резкой переменой глобального климата. Учитывая исследования последних лет, выполненные В.Ф.Мартазиновой [156,157,213], следует отметить, что центры атмосферных образований на протяжении прошедшего столетия сдвигались, что должно было оказать влияние и на синхронность колебаний годового стока.

Непосредственно для территории Украины исследования по синхронности колебаний годового стока выполнялись в УкрНИГМИ [214]. В качестве критерия районирования использовался коэффициент асинхронности. Величина данного коэффициента определяется по соотношению суммарного хронологического стока $Q_{P,X}$ к суммарному равнообеспеченному стоку $Q_{P,C}$

$$k_{AC} = \frac{Q_{P,X}}{Q_{P,C}}, \quad (4.1)$$

где k_{AC} - коэффициент асинхронности;

$Q_{P,X}$ - суммарный хронологический сток;

$Q_{P,C}$ - суммарный равнообеспеченный сток.

Для определения суммарного хронологического стока суммируют сток исследуемых рек за каждый год, затем эти величины располагают в убывающем порядке, устанавливают обеспеченность каждого члена ряда и находят расход маловодного года заданной обеспеченности. Суммарный равнообеспеченный сток - это сумма величин стока заданной обеспеченности, рассчитанная по каждой реке отдельно. По существу, величина коэффициента асинхронности определяется различиями

коэффициентов вариации для суммарного (объединенного) водосбора и частного водосбора. Чем больше это различие, тем больше коэффициент асинхронности. В развернутом виде (4.1) записывается следующим образом

$$k_{AC} = \frac{Q_{0,X} k_{P,X}}{Q_{01} k_{P,1} + Q_{02} k_{P,2} + Q_{03} k_{P,3} \dots Q_{0j} k_{P,j} \dots + Q_{0N} k_{P,N}} \quad (4.2)$$

где $Q_{0,X}$ - норма суммарного хронологического ряда стока;

$k_{P,X}$ - модульный коэффициент суммарного хронологического ряда расчетной обеспеченности P ;

Q_{0j} - норма стока j -того ряда;

$k_{P,j}$ - модульный коэффициент j -того ряда.

Анализ коэффициентов асинхронности в пределах Украины проводился для Дуная и Днестра и показал, что при соединении данных по рекам Дунай и Днестр эффект асинхронности незначителен, суммарные водные ресурсы превышают равнообеспеченные менее, чем на 5%, т.е. изменяются в пределах точности вычисления норм годового стока. Не наблюдается существенного эффекта и в случае присоединения к рр. Дунай и Днестр реки Южный Буг. Это естественно, так как водность р. Южный Буг составляет ничтожную долю по сравнению с водностью р. Днестр и, особенно, р. Дунай. Лишь присоединение к указанным рекам рек Днепр и Северский Донец дало ощутимый эффект асинхронности - 10%.

В настоящее время основным способом оценки синхронности колебаний годового стока является анализ матрицы коэффициентов парной корреляции рядов стока. Применение современной вычислительной техники позволяет получать большие массивы коэффициентов корреляции, характеризующие синхронность колебаний стока в большом количестве пунктов. Для анализа структуры корреляционных матриц обычно используются методы многомерного статистического анализа.

4.2.2. Теоретические основы метода факторного анализа.

В основе моделей факторного анализа лежит гипотеза о том, что данные наблюдений являются лишь косвенными характеристиками изучаемого явления которое можно описать при помощи небольшого числа неких параметров или свойств [84,154,235]. Такие теоретические параметры или свойства называют (при использовании данного метода) факторами. Задача факторного анализа - представить данные наблюдений в виде линейных комбинаций факторов. Та часть данных, которая не описывается конечным

числом факторов, образует остатки. Основная модель факторного анализа может быть представлена в виде:

$$\varphi_j = \sum_{p=1}^k l_{jp} f_p + v_j, \quad (4.3)$$

где φ_j - нормированная исходная переменная;

k - число факторов;

l_{jp} - факторная нагрузка (общий термин, означающий коэффициенты матрицы факторного отображения или структуры);

f_1, f_2, \dots, f_k - некоррелируемые между собой факторы;

v_j - независимые остатки.

В свою очередь матрицей факторного отображения называют матрицу коэффициентов, в которой столбцы соответствуют общим факторам, а строки - наблюдаемым переменным. Элементы матрицы факторного отображения представляют собой коэффициенты регрессии для общих факторов при условии, что наблюдаемые переменные являются линейной комбинацией факторов.

Факторы учитывают корреляцию между переменными, т.е. они представляют структуру корреляционной матрицы в терминах модели. Остатки являются случайными величинами, не связанными ни между собой, ни с факторами. Элементы корреляционной матрицы, нагрузки и дисперсии остатков связаны соотношениями

$$r_{jj} = \sum_{p=1}^k l_{jp}^2 + v_j, \quad (4.4)$$

$$r_{ji} = \sum_{p=1}^k l_{jp} l_{ip} \quad \text{при } j \neq i, \quad (4.5)$$

где r_{ij} - элементы корреляционной матрицы; l_{ip} - факторные нагрузки; v_j - независимые остатки.

Квадраты факторных нагрузок представляют доли дисперсии рядов наблюдений, приходящиеся на соответствующие факторы. Например, l_{25}^2 - это вклад второго фактора в дисперсию ряда φ_5 . Сумма квадратов факторных нагрузок по всем выделенным факторам

$$h_j^2 = \sum_{p=1}^k l_{jp}^2 \quad (4.6)$$

определяет полноту отражения j -того ряда наблюдений в факторах f_p . Факторная дисперсия h_j^2 связана с остатками соотношением

$$h_j^2 = 1 - e_j^2, \quad (4.7)$$

где h_j^2 - факторная дисперсия;

e_j^2 - дисперсия остатков.

Полный вклад S_p (в процентах) фактора f_p в суммарную дисперсию нормированных рядов наблюдений (полей) определяется выражением

$$S_p = \frac{\sum_{j=1}^m l_{pj}^2}{m} 100\%, \quad (4.8)$$

где m - число рядов.

Общий вклад всех выделенных факторов в суммарную дисперсию исследуемых рядов равен

$$S = \sum_{p=1}^k S_p \quad (4.9)$$

Когда в факторном анализе рассматриваются не связи между признаками, а связи между рядами, вступает в силу Q -техника факторного анализа, которая обычно рассматривается как вариант кластерного анализа [154]. Не останавливаясь на физической интерпретации факторов, при исследовании синхронности колебаний годового стока в практике гидрологических расчетов [78,91] применяют следующие графические построения. В случае, если первых два фактора описывают более 60 % дисперсии, на графике, оси которого представляют два фактора, проводят векторы из начала координат в точку с координатами, соответствующими факторным нагрузкам. Учитывая, что длина вектора

$$d_j = \sqrt{l_{j1}^2 + l_{j2}^2}, \quad (4.10)$$

где l_{j1} и l_{j2} - факторные нагрузки, определяет полноту отражения j -го ряда наблюдений в первых двух факторах, а косинус угла между j -тым и i -

тым вектором есть коэффициент корреляции между ними, о степени связи между рядами можно судить по формирующимся группировкам точек. В качестве меры сходства в данном случае используется мера расстояния. Применение Q - модификации факторного анализа позволяет сжать информацию, содержащуюся в корреляционной матрице, и интерпретировать её.

С целью выполнения одновременного анализа трех эффективных факторов в [78] рекомендуется представлять нагрузки не в декартовых, а в полярных координатах

$$\theta_j = \arcsin \frac{l_{j3}}{d_j}, \quad (4.11)$$

$$\lambda_j = \arcsin \frac{l_{j2}}{\sqrt{l_{j1}^2 + l_{j2}^2}}, \quad (4.12)$$

где

$$d_j = \sqrt{l_{1j}^2 + l_{2j}^2 + l_{3j}^2} \quad (4.13)$$

а θ и λ - полярные координаты (в град.), определяющие положение пересечения j -тым вектором единичной сферы.

Величина d_j оценивает информативность данных каждого пункта, включенного в анализ. Близость d_j к единице указывает на то, что дисперсия рассматриваемой переменной в значительной мере объясняется первыми факторами.

4.2.3. Особенности применения метода главных компонент к районированию территории по синхронности колебаний годового стока. Как уже отмечалось в разделе 3, метод главных компонент также, как и метод факторного анализа позволяет “сжимать” исходную информацию и анализировать ее. Помимо метода факторного анализа, можно назвать большое число ортогональных функций (полиномов), которые можно использовать для аппроксимации двумерных гидрометеорологических полей. Это, например, полиномы Лежандра, Лаггера, Эрмита, Чебышева 1-го и 2-го рода и др. Однако, разложение полей на основе полиномов в значительной степени формально в том смысле, что коэффициенты разложения не несут смысловой информации. В методе главных компонент разложение полей приводит к системе ортонормированных функций, значение которых зависит от статистических свойств исследуемого поля, откуда и происходит название – “естественные ортогональные функции”.

Основное различие между методом факторного анализа и методом главных компонент заключается в том, что главные компоненты являются линейными функциями от наблюдаемых переменных в то время как факторы f не выражаются через комбинацию наблюдаемых переменных. С помощью анализа главных компонент, также, как и факторного анализа, достигается сжатие данных, но основная задача состоит не в объяснении корреляции между переменными, а в объяснении максимальной доли дисперсии наблюдений. Факторный анализ представляет ковариационную структуру в терминах гипотетической модели, в то время как анализ главных компонент сокращает данные посредством использования нескольких линейных комбинаций наблюдаемых переменных [235]. Тем не менее, и факторный, и компонентный анализ взаимодополняют друг друга, позволяя анализировать и обобщать данные о структуре гидрометеорологических полей, что позволило ряду авторов [78,91,216] успешно использовать эти методы многомерного статистического анализа для районирования территорий по синхронности колебаний годового стока.

При районировании по синхронности колебаний годового стока на основе разложения по естественным ортогональным функциям формальным показателем синхронности колебаний годового стока является отсутствие смены знака в поле базисной функции. Если же смена знака происходит, то это свидетельствует о наличии противофазности в колебаниях стока по территории. Нулевая изолиния базисной функции рассматривается при этом как граница раздела между территориями с синхронными колебаниями стока. В частности, на основе второй и третьей базисных функций Н.П.Смирновым и В.Л.Скляренко [216] было выполнено районирование по синхронности колебаний годового стока Европейской территории бывшего Советского Союза, согласно которому установлена меридиональная противофазность в колебаниях стока основной части рек Украины и Северского Донца.

Следует отметить, что работы по исследованию синхронности колебаний годового стока рек Украины выполнялись только на базе данных для крупных рек, а именно, - рр. Днепр, Северский Донец, Южный Буг, Дунай, Днестр, что не всегда правомерно, так как большие реки и их притоки могут иметь существенные различия в особенностях колебаний годового стока, в связи с тем, что сток больших формируется не в одной, а нескольких физико - географических зонах.

4.2.4. Районирование территории Украины по синхронности колебаний годового стока на основе методов многомерного статистического анализа. Для районирования колебаний годового стока рек Украины по синхронности нами использованы массивы коэффициентов корреляции между годовым стоком рек. К анализу структуры корреляционных матриц были применены современные методы многомерного статистического анализа - Q-модификация факторного

анализа и метод главных компонент [154,268]. С помощью этих методов достигается “сжатие” данных исходных матриц, что существенно облегчает их анализ. В первом случае выделяется несколько первых гипотетических факторов, а во втором - несколько первых компонент разложения полей годового стока, которые, как правило, описывают основную часть дисперсии ($> 70\%$) полей исходных данных. В Q - модификации факторного анализа, где рассматриваются не связи между признаками, а связи между рядами, вступает в силу Q -техника факторного анализа, которая обычно рассматривается как вариант кластерного анализа [235].

Учитывая неодинаковую гидрологическую изученность различных регионов Украины, исследования проводились как на материалах отдельных её регионов, так и для опорных водосборов, распределенных равномерно по всей территории страны. При анализе корреляционных матриц на основе методов многомерного статистического анализа большое значение имеет устойчивость полученного решения, так как на результаты может оказывать влияние объем выборки, плотность распределения объектов на данной территории и места их расположения. Для проверки устойчивости решения использовались численные эксперименты, в которых менялись состав выборок и их продолжительность. При проведении границ районов и подрайонов учитывались результаты районирования, полученные как по регионам, так и для территории всей Украины в целом.

Остановимся подробнее на результатах факторного анализа применительно к территории всей Украины. Нами было рассмотрено 47 водосборов равномерно распределенных по территории Украины с продолжительностью наблюдений за годовым стоком равной 40 годам (с 1947 по 1986 гг.). Площади выделенных водосборов изменяются в диапазоне от 94,1 кв. км до 30000 кв.км. Суммарный вклад первых двух выделенных факторов составил 55% от суммарной дисперсии исходных данных, а первых трех - 66%. Наименее информативными ($d < 0,5$) в представленной выборке являются водосборы Горного Крыма (№ 703, 701), для оценки синхронности колебаний которых использовалась отдельная выборка с более коротким периодом наблюдений.

При анализе нагрузок на первые два фактора (рис.4.1) было выделено две основных группировки, разделяющих исследуемую территорию на западную (I) и восточную (II) части - районы. Центры группировок находятся под углом близким к 80° , что свидетельствует о наличии слабых корреляционных связей ($r < 0.4$) между значениями годового стока водосборов, входящих в разные группировки. Таким образом, колебания годового стока западной и восточной можно назвать асинхронными.

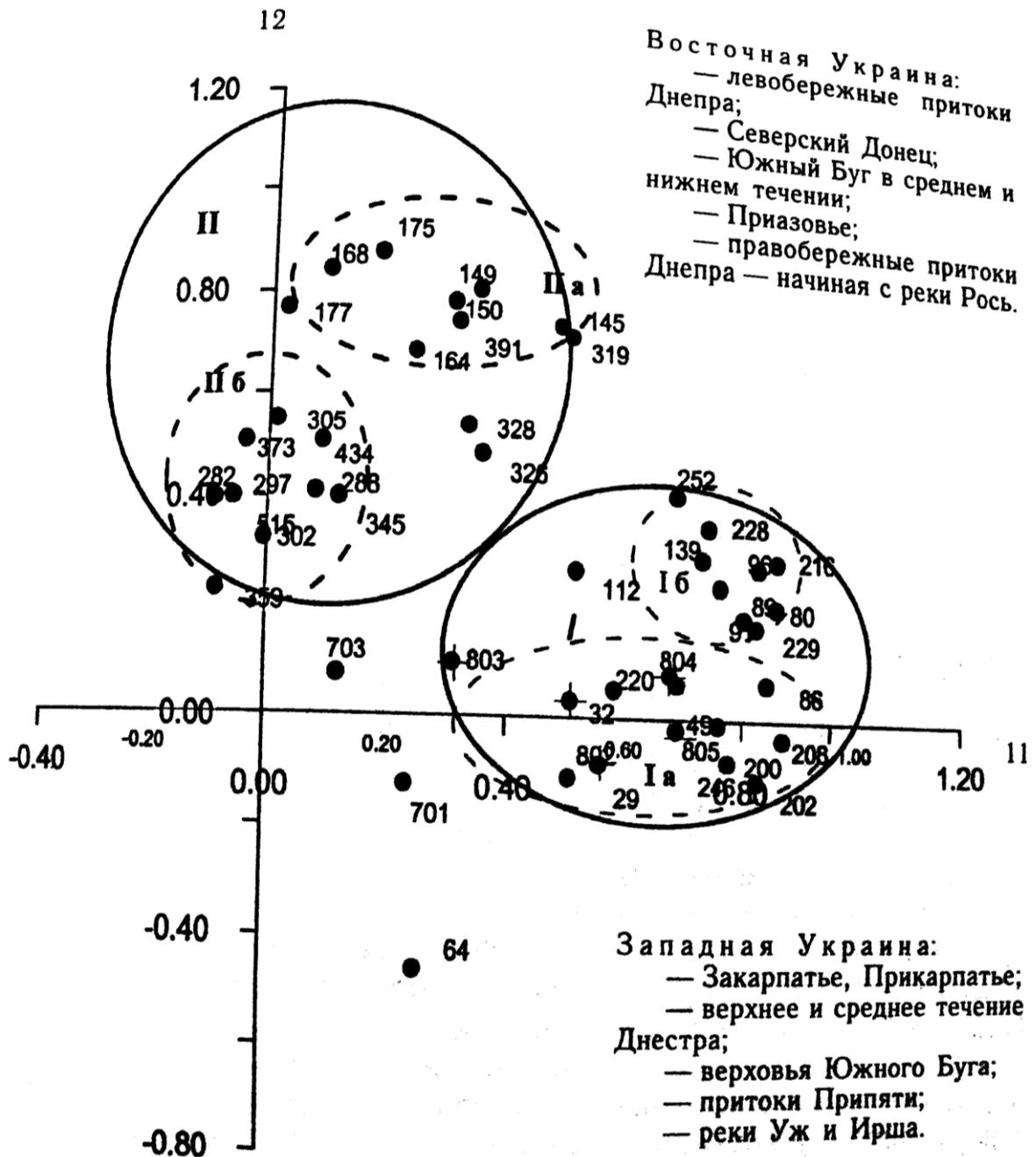


Рис. 4.1. Выделение территориальных группировок с синхронными колебаниями годового стока рек Украины на основе анализа связей между нагрузками на первый и второй фактор:

цифры около точек — номера постов

Группировку I формируют водосборы Карпат, бассейны рр. Западный Буг, Днестр, Припять, верховья р. Южный Буг; группировку II — бассейны рр. Днепр, Северский Донец и Приазовье. К группировке II отнесена также юго-западная Украина, в состав ансамбля объектов при этом вошли среднее и нижнее течение р. Южный Буг.

Таким образом, Q - модификация факторного анализа позволяет дать компактную трактовку корреляционной матрицы, рассматривая каждую группировку водосборов как район с синфазными колебаниями годового стока. Внутри группировок (районов) можно выделить отдельные группы точек, которые по их территориальному расположению интерпретировать как подрайоны, например, подрайон Па и Пб (рис.4.1). Что касается группировки I, то выделение подрайонов в ее границах сложно из-за большого разброса точек. Наиболее целесообразным решением вопроса является исследование корреляционных матриц внутри выделенных районов (западного и восточного) с привлечением к анализу дополнительного числа водосборов [134,137,141]. При этом можно выделить более тесно расположенные группировки и соответствующие им территориальные подрайоны с колебаниями стока, синхронность которых может быть оценена осредненным по территории коэффициентом корреляции $R_{CP} \geq 0,7$. Как известно, в нормативном документе СНИПа 2.01.14 - 83 линейная связь между стоком двух сравниваемых рек, оцениваемая коэффициентом корреляции $r \geq 0,7$, является обязательным условием при выборе реки-аналога.

Для уточнения границ районов и подрайонов использовались также результаты разложения полей годового стока по естественным ортогональным функциям. В разделе 3 было отмечено, что знак второй базисной функции U_2 можно рассматривать правило классификации. Например, состав выделенных объектов с синфазными колебаниями годового стока для северо-западной Украины одинаков как при использовании факторного анализа (рис.4.2), так и при применении метода главных компонент (табл.4.1), поэтому в качестве границы между группировками может быть использована нулевая изолиния $U_2 = 0$.

Проведенные исследования позволили выполнить районирование территории Украины по синфазности и синхронности колебаний годового стока, показанное на рис. 4.3. Согласно этому районированию, территория Украины делится на три района с асинхронными колебаниями годового стока. Район I (Западный) включает в себя реки Закарпатья, Предкарпатья, бассейны р.Прут, р.Днестр (включая территорию Молдовы), р. Западный Буг, правобережные притоки р.Припять, верховья р.Южный Буг (до впадения р.Ров, включительно), а также правобережные притоки р.Днепр до впадения р.Рось.

К району II (Восточному) относятся левобережные и правобережные (начиная с р. Рось) притоки р. Днепр, среднее и нижнее течение р. Южный Буг, междуречья Дунай - Днестр и Днестр - Южный Буг, р.Северский Донец и Приазовье.

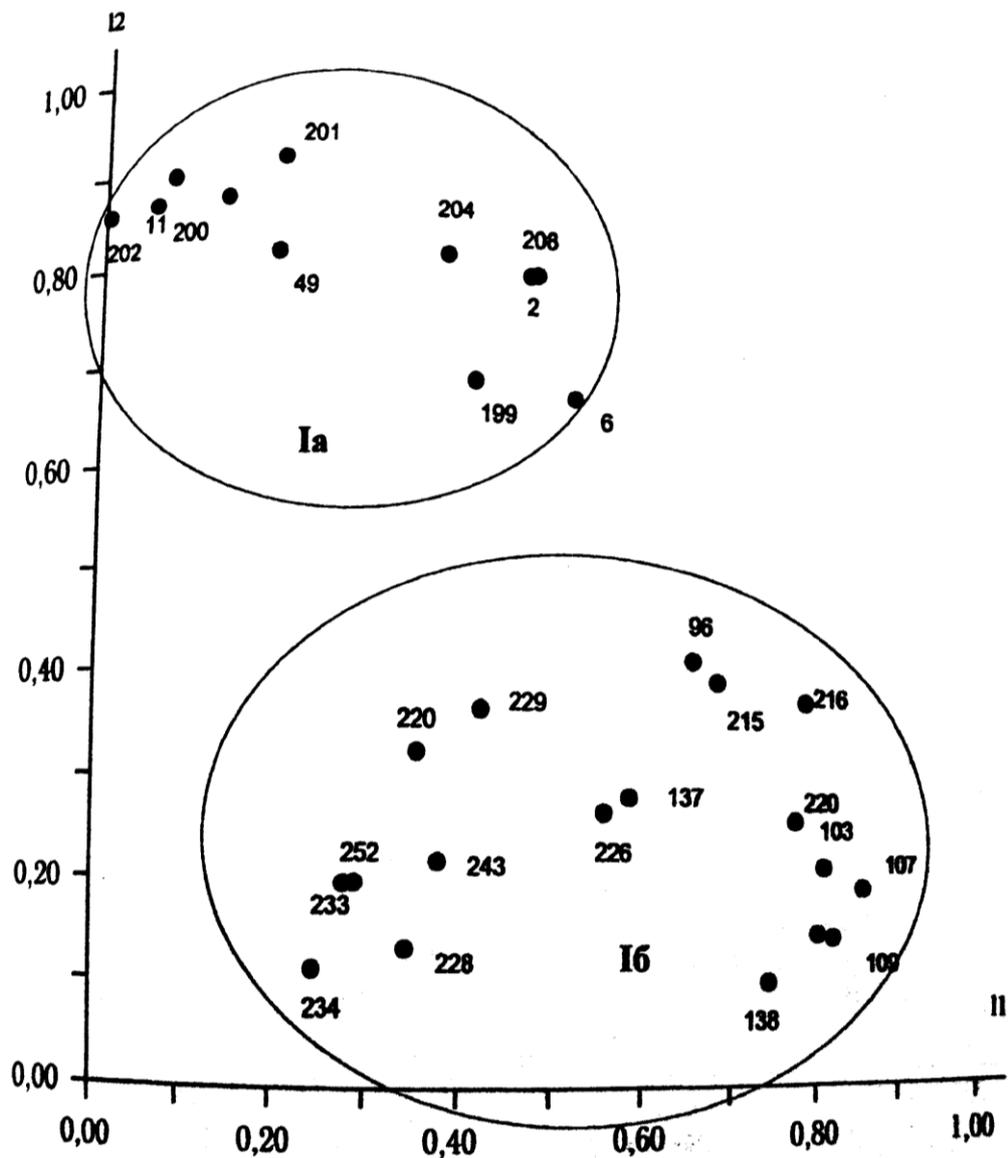


Рис. 4.2. Выделение группировок с синхронными колебаниями годового стока рек на основе анализа связей между нагрузками на первый и второй фактор для рек Северо-Западной Украины — Полесья и Подолья:

цифры около точек — номера постов

Территория Горного Крыма выделена в отдельную область как район III, ввиду резко отличающихся от остальной части Украины условий формирования климата и стока.

Достоверность полученного районирования подтверждают осредненные в пределах выделенных районов коэффициенты корреляции. Так, при объединении в одну группировку рек всей Украины, средний коэффициент корреляции стремится к нулю, в то время как в рамках выделенных районов осредненный коэффициент корреляции превышает значения равные 0,4.

Таблица 4.1 - Базисные функции (весовые коэффициенты) первых трех компонент разложения корреляционной матрицы полей годового стока рек северо-западной Украины

№	Река -пункт наблюдений	U_1	U_2	U_3
правобережные притоки Припяти				
199	р.Выжевка - с.Руда	0,1938	0,1334	-0,0132
200	р.Выжевка - пгт. Старая Выжевка	0,1822	0,2459	0,1570
201	р.Турья - с. Ягодное	0,1831	0,2785	0,0705
202	р.Турья - г.Ковель	0,1398	0,2965	0,1517
204	р.Стоход - с.Богушовка	0,1930	0,2124	-0,0436
208	р.Стырь - г.Луцк	0,1915	0,2100	-0,1129
215	р.Горынь -пгт. Ямполь	0,1819	-0,0068	-0,2259
216	р.Горынь - с.Ожежин	0,2123	-0,0642	-0,1859
220	р.Вырка - с.Сварыни	0,1654	-0,0616	0,1129
222	р.Случь - с.Большая Клитна	0,2159	-0,1445	-0,1256
226	р.Случь - г.Сарны	0,2155	-0,1606	0,1108
228	р.Тня -с.Броники	0,1897	-0,2035	0,2568
229	р.Смолка -Суслы	0,2006	-0,0841	0,1537
233	р.Уборть -с.Перга	0,1719	-0,1559	0,2857
Западный Буг				
2	р.Западный Буг -г.Сасов	0,1850	0,2252	-0,1771
6	р.Полтва - г. Буск	0,1948	0,1334	-0,1281
9	р.Рата - с.Волица	0,1662	0,2840	0,1480
11	р.Свиня - г.Нестеров	0,1564	0,2798	0,1450
притоки Днепра				
234	р.Уж - г.Коростень	0,1708	-0,2082	0,3481
252	р.Ирша - с.Украинка	0,1810	-0,1691	0,3029
243	р.Тетерев - с.Троща	0,1846	-0,1535	0,2099
притоки Южного Буга				
137	р. Бужок - с.Межджибож	0,2093	-0,1358	0,0410
138	р.Иква - пгт. Старая Синява	0,1719	-0,1724	-0,1905
№	Река -пункт наблюдений	U_1	U_2	U_3
притоки Днестра				
49	р.Щерек-с.Щирец	0,1454	0,2795	-0,0260
96	р.Серет- г.Чортков	0,1951	-0,0201	-0,1486
103	р.Жванчик - с. Кугаевцы	0,1949	-0,1344	-0,2204
105	р.Смотрич - г.Купин	0,2073	-0,1646	-0,2175
107	р.Мукша - с. Малая Слободка	0,1835	-0,1581	-0,2439
109	р.Ушица-г.Зиньков	0,1743	-0,1411	-0,2667

Внутри района I выделяется группировка Ia, к которой относится вся западная часть Украины. Граница выделенного подрайона проходит по

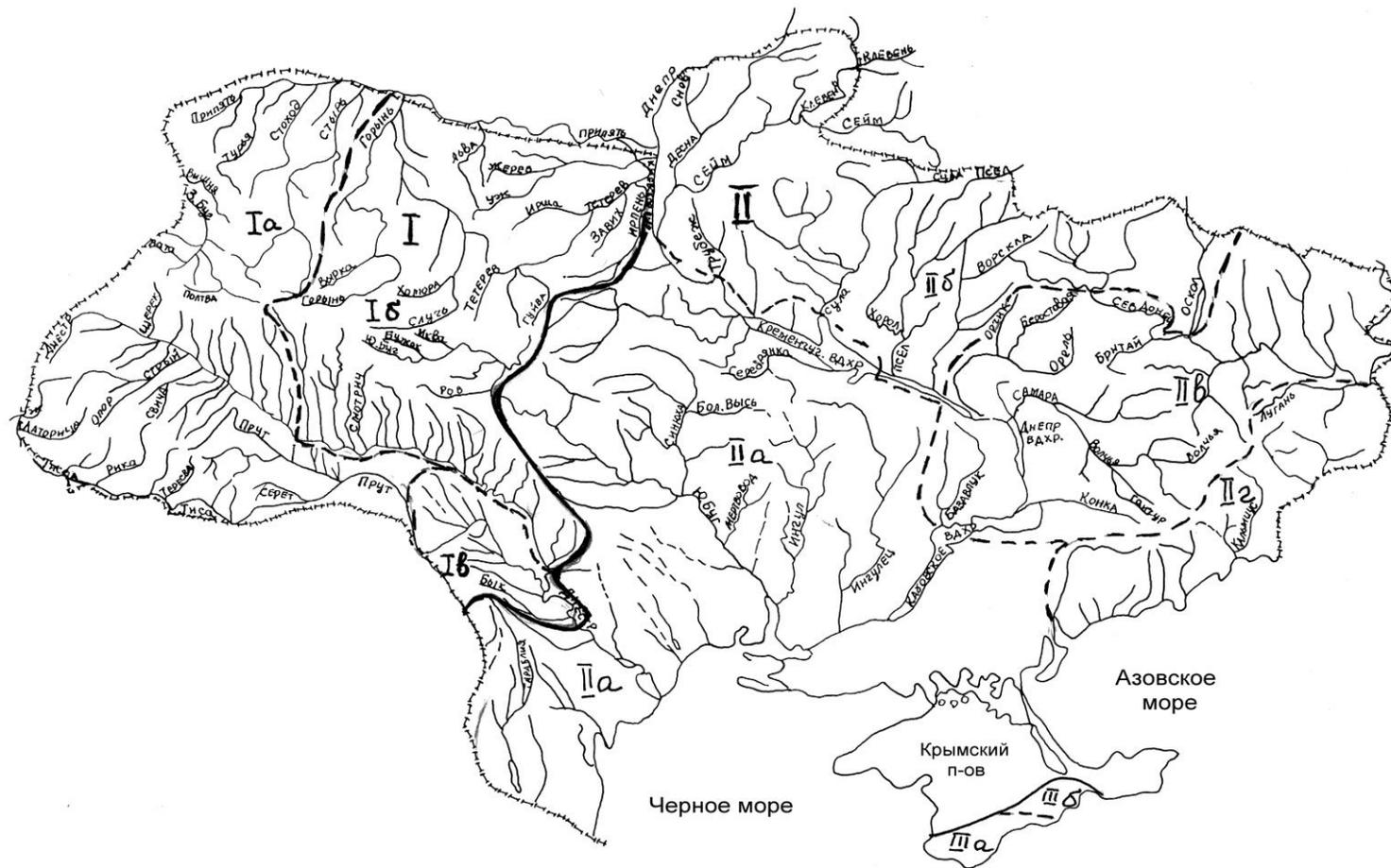


Рис. 4.3 Карта-схема районов с синхронными колебаниями годового стока рек Украины

водоразделам между реками Стырь и Горынь, между р. Стрыпа и р. Серет и далее по водоразделу р. Прут.

Подрайон соответствующий группировке Ib состоит из водосборов правобережных притоков Припяти, начиная от р. Горынь, правобережных притоков Днестра до впадения р. Рось, левобережных притоков Днестра, начиная от р. Серет и заканчивая р. Марковка и верховья р. Южный Буг.

Группировка Iv включает реки Молдовы. Нижнюю границу этой группировки провести достаточно сложно, поскольку реки Южной Молдовы подверглись значительным водохозяйственным преобразованиям. Для обоснования районирования годового стока рек Молдовы и юго-западной Украины метод факторного анализа был применен к полям годовых осадков этой же территории. Установлено, что выделенные территориальные районы с синхронными колебаниями стока и осадков, в основном, совпадают. На этой основе и проводилось разграничение между реками Причерноморья и Молдовы.

Начиная от водосбора р. Рось, все правобережные притоки Днестра формируют подрайон IIa. В этот же район входят все притоки р. Южный Буг, ниже впадения р. Ров; реки междуречий Дунай - Днестр и Днестр - Южный Буг. Группировке IIa принадлежат и такие левобережные притоки Днестра как р. Молокиш и р. Ягорлык.

Левобережная Украина также может быть подразделена на группировки. Группировка IIb включает в себя левобережные притоки Днестра, расположенные в пределах лесной и лесостепной зоны. К ней же относятся верховья р. Северский Донец до р. Оскол включительно. Начиная с бассейна реки Орель образуется подрайон 2в, к которому относится водосбор р. Северский Донец ниже впадения р. Оскол и р. Базавлук, являющаяся правобережным притоком Днестра. В соответствии с физико-географическим районированием этот район соответствует Левобережно-Днепровской северо-степной провинции [240]. Подрайон 2г объединяет реки Приазовья.

Правомерность выделения подрайонов подтверждается более высокими (по отношению ко всему району) значениями осредненных в пределах группировок коэффициентов корреляции. Например, в пределах района III (Горный Крым) $R_{CP} = 0,48$, а при выделении западной и восточной частей коэффициенты R_{CP} принимают значения, равные 0,82 и 0,71, соответственно.

Установлено, что при включении в исходную выборку данных по рекам, сток которых существенно преобразован хозяйственной деятельностью, возможно формирование “ложных” подрайонов с

синхронными колебаниями годового стока. Такой подрайон, состоящий из статистически неоднородных рядов, был получен для рек Донецкого бассейна (рис.4.4), в который вошли водосборы рек Кальмиус,Крынка, Кальчик [134]. Эти реки являются частью системы переброски стока по каналу Северский Донец- Донбасс. В целях бесперебойного водоснабжения предусмотрены резервные водохранилища, среди которых находится

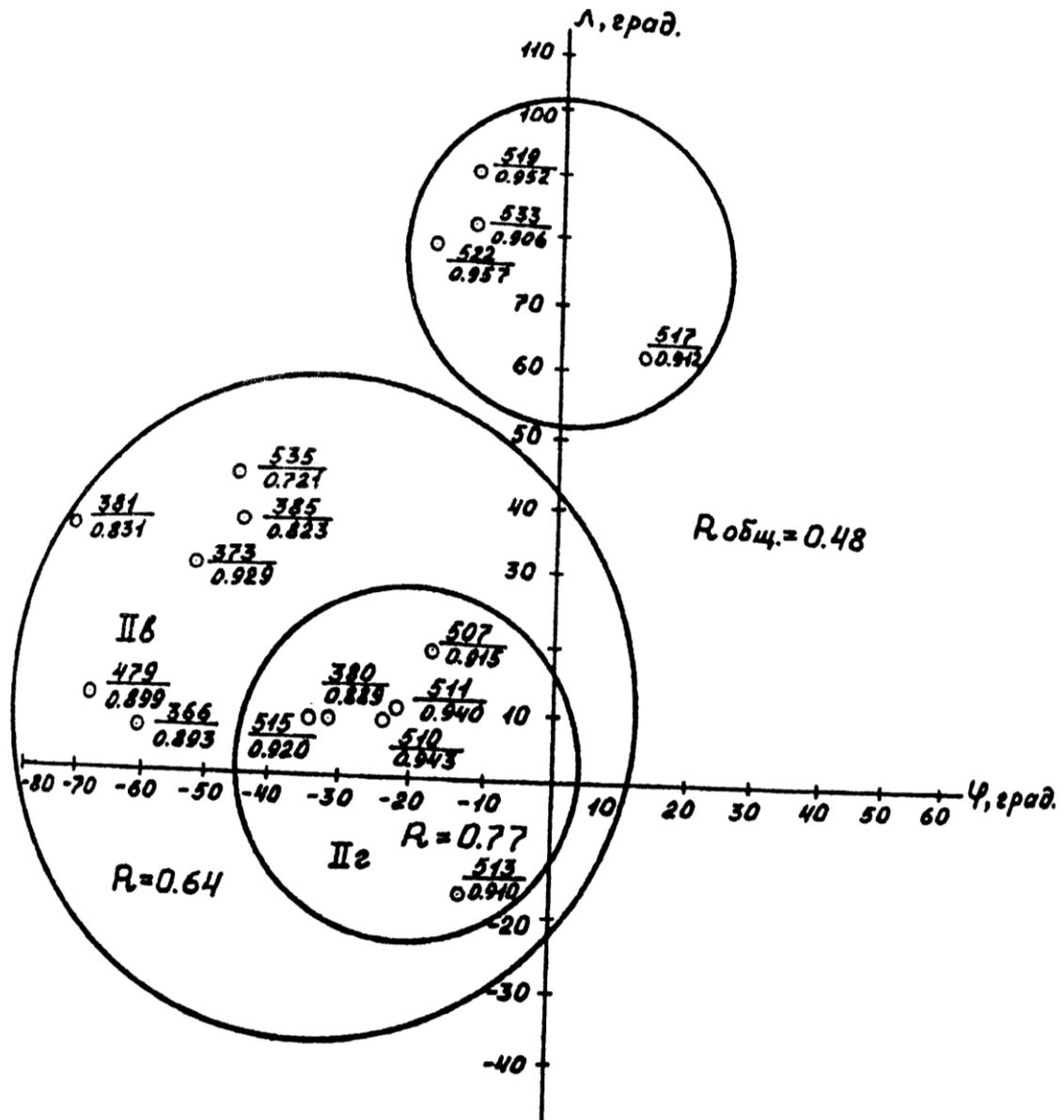


Рис. 4.4. Выделение территориальных группировок с синхронными колебаниями годового стока на основе сравнения факторных нагрузок первых трех факторов при использовании Q-модификации факторного анализа для рек Донецкого края и Приазовья:

цифры около точек — номера постов

Верхнекальмиусское (начало действия - 1968 г.). Помимо него на р. Кальмиус расположено Кальмиусское водохранилище, наполняемое шахтными и промышленными водами. Средний годовой приток реки по подсчетам Донбассводтреста [226,241] составляет $0,96 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, а приток шахтных и промышленных вод - $9,32 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. На реке Кальчик в 18 км от устья действует Старо-крымское водохранилище, предназначенное для питьевого водоснабжения г. Мариуполь. В верховье реки Крынки расположено Волынцевское водохранилище, которое также аккумулирует воду из канала Северский Донец - Донбасс. Ряды годового стока с указанных водосборов являются статистически неоднородными, в то время как ряд годовых сумм осадков (по метеорологической станции Волноваха), рассмотренный за тот же расчетный период является статистически однородным [134]. Влияние сброса промышленных и шахтных вод отчетливо прослеживается на графиках колебаний годового стока во времени и совмещенных графиках разностных интегральных кривых.

Аналогичная ситуация складывается и при исследовании колебаний рек Горного Крыма, где на фоне выделенных группировок резко выделяется точка, соответствующая водосбору р.Салгир – г.Симферополь.

4.3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ОБОБЩЕНИЕ ОЦЕНОК СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОДОВОГО СТОКА, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ПО НАБЛЮДЕННЫМ ДАННЫМ С МАЛОЙ ДОСТОВЕРНОСТЬЮ, НА ОСНОВЕ МЕТОДА СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ИСХОДНЫХ РЯДОВ СТОКА

Одним из современных методов обоснования целесообразности, способа и степени географического обобщения характеристик стока является метод совместного анализа ансамблей гидрологических объектов, предложенный С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем [118-120].

4.3.1. Теоретические основы метода совместного анализа. В гидрологических расчетах обычно используется математическая модель, описывающая вероятностную природу его колебаний. Такие модели включают ряд гипотез, позволяющих свести расчеты к статистической оценке нескольких параметров модели (среднее арифметическое, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, коэффициент автокорреляции).

Даже при длинных рядах наблюдений оценки отдельных параметров определяются с большой погрешностью, т.е. являются статистически незначимыми. К числу таких параметров относятся прежде всего коэффициенты автокорреляции $r(1)$ и асимметрии C_s , а также расчетное соотношение C_s/C_v .

Ограниченность во времени имеющихся наблюдений по большинству рядов годового стока рек Украины порождает статистическую неустойчивость этих параметров, которая может быть эффективно компенсирована за счет дополнительной информации о пространственных закономерностях распределения речного стока. Для повышения надежности оценок таких статистических параметров рекомендуется выполнять их пространственное обобщение. При помощи метода, предложенного С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем [118-120], можно обосновать характер этого обобщения: картирование или районирование параметра. Суть метода сводится к определению составляющих пространственной дисперсии какого-либо статистического параметра A - географической и случайной

$$\sigma_{II}^2 = \sigma_{Г}^2 + \sigma_{С}^2 , \quad (4.14)$$

где σ_{II}^2 - полная составляющая дисперсии параметра;

$\sigma_{Г}^2$ - географическая составляющая дисперсии параметра;

$\sigma_{С}^2$ - случайная составляющая дисперсии параметра.

При этом полная пространственная дисперсия параметра оценивается по формуле

$$\sigma_{II}^2 = \frac{\sum_{j=1}^k (A_j - A_{CP})^2}{k - 1} , \quad (4.15)$$

где k - число водосборов, объединенных в одну группу;

j - порядковый номер рассматриваемого водосбора;

A_j - индивидуальная оценка параметра;

A_{CP} - осредненная в пределах выделенной группы оценка параметра.

Случайная составляющая пространственной дисперсии параметра определяется как средняя для группы объектов дисперсия выборочного параметра

$$\sigma_{С}^2 = \frac{\sum_{j=1}^k \sigma_{Aj}^2}{k} , \quad (4.16)$$

где σ_{Aj} - среднее квадратическое отклонение индивидуальной оценки параметра A .

Географическая составляющая находится при помощи обратного расчета из (4.14)

$$\sigma_{\Gamma}^2 = \sigma_{\Pi}^2 - \sigma_C^2 \quad (4.17)$$

Если выполняется условие

$$\frac{\sigma_C^2}{\sigma_{\Pi}^2} > \frac{\sigma_{\Gamma}^2}{\sigma_{\Pi}^2}, \quad (4.18)$$

то можно сделать вывод, что пространственное распределение исследуемого параметра в большей степени определяется случайными свойствами объединяемых выборок и в меньшей - изменением физико-географических условий по территории. Следовательно, выборочные оценки параметров могут быть осреднены в пределах изучаемой территории. Необходимо подчеркнуть, что качество объединения тем выше, чем меньше вклад географической составляющей в пространственную дисперсию параметра. Географическая составляющая является по существу оценкой статистической неоднородности исходного материала. Когда оценки выборочных параметров очень велики, географическая составляющая дисперсии, вычисленная обратным расчетом по (4.17), может принимать отрицательные значения. В этом случае вклад случайной составляющей пространственной дисперсии параметра может быть принят равным 100% , а географической – 0,0%.

Среднее квадратическое отклонение осредненной оценки статистического параметра рассчитывается по соотношению

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{\sigma_C^2}{k} + \sigma_{\Gamma}^2} \quad (4.19)$$

Величина σ_{cp} наряду с условием (4.18) также может рассматриваться как критерий качества объединения. Осредненная оценка параметра признается статистически достоверной, когда выполняется условие

$$A_{CP} > 2\sigma_{CP} \quad (4.20)$$

В ходе последовательного объединения параметров можно выявить ряды, статистические свойства которых отличаются от свойств генеральной совокупности: по мере увеличения числа объединяемых

объектов k при незначительном росте географической составляющей σ_G^2 дисперсия осредненного по объединяемой совокупности параметра σ_{cp}^2 в соответствии с выражением (4.19) должна уменьшаться. “Всплески” в убывающей функции $\sigma_{cp}^2 = \varphi(k)$ свидетельствуют о том, что параметр k - того ряда стока в значительно большей степени, чем параметры других рядов, отличается от осредненной оценки. Для таких рядов в последующих расчетах рекомендуется использовать не осредненную, а уточненную (совмещенную) оценку параметра, за исключением случаев, когда ряд является статистически неоднородным вследствие его искажения водохозяйственными преобразованиями.

В гидрологических расчетах также используются допустимые относительные средние квадратические ошибки $\varepsilon_{Доп.}$ [203] определения некоторого параметра A . Если $\varepsilon_A \leq \varepsilon_{Доп.}$, то выборочное значение параметра принимается к расчету. Величина ε_A определяется по формуле

$$\varepsilon_A = \frac{\sigma_A}{A} \cdot 100\%, \quad (4.21)$$

где σ_A - среднее квадратическое отклонение оценки параметра A .

Например, при определении коэффициента вариации годового стока в качестве допустимой принимается $\varepsilon_{CV} = 15\%$ [203].

Для статистических параметров, которые рассчитываются по наблюдаемым данным с большим среднеквадратическим отклонением, осредненная в пределах объединяемой совокупности оценка является более достоверной, чем индивидуальная. Осредненные оценки статистических параметров рекомендуются к использованию при построении стохастических моделей, а также при описании статистических распределений характеристик стока тех водосборов, на которых наблюдения за стоком отсутствуют.

Уточненная по совокупности рассматриваемых объектов оценка статистического параметра рассчитывается по выражению [120]

$$A'_{Инд.} = \frac{A_{Инд.} \cdot \sigma_{CP}^2 + A_{CP} \sigma_{Инд.}^2}{\sigma_{CP}^2 + \sigma_{Инд.}^2}, \quad (4.22)$$

где $A'_{Инд.}$ - уточненная оценка исходного значения параметра $A_{Инд.}$ с учетом информации, вошедшей в объединяемую совокупность;

$A_{ИИД}$. - исходное значение параметра по j -тому рассматриваемому объекту (водосбору); $\sigma_{ИИД}^2$. - дисперсия параметра $A_{ИИД}$. по j -тому рассматриваемому объекту (водосбору); $A_{СР}$ - осредненная в пределах выделенной группы объектов оценка параметра A ; $\sigma_{СР}^2$ - дисперсия осредненной в пределах выделенной группы объектов оценки статистического параметра.

Среднее квадратическое отклонение уточненного значения параметра определяется на основе следующей формулы, полученной на основе метода статистических испытаний

$$\sigma'_{ИИД} = \frac{\sigma_{ИИД} \cdot \sigma_{СР}}{\sqrt{\sigma_{ИИД}^2 + \sigma_{СР}^2}}, \quad (4.23)$$

где $\sigma'_{ИИД}$. - среднее квадратическое отклонение уточненного параметра $A'_{ИИД}$. по j -тому рассматриваемому объекту (водосбору); $\sigma_{ИИД}$. - среднее квадратическое отклонение параметра $A_{ИИД}$. по j -тому рассматриваемому объекту (водосбору).

Таким образом, метод С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля позволяет решать многие, поставленные в разделе 4.1, задачи географического обобщения. Например, задача выбора способа географического обобщения может быть решена при рассмотрении условия (4.18). Если условие выполняется, то в качестве способа географического обобщения выбирается районирование, если не выполняется – картирование исследуемой характеристики в виде изолиний. Определение степени и пределов географического обобщения может опираться на выполнение условия (4.20) и вид зависимости $\sigma_{СР}^2 = \varphi(k)$. Рост географической составляющей полной дисперсии параметра будет тем интенсивнее, чем шире пределы обобщения. С другой стороны, для географически близких водосборов сходство условий формирования стока приводит к тому, что колебания стока оказываются синхронными т.е. скоррелированными. Как известно, пространственная скоррелированность сокращает объем той дополнительной информации, которая получается за счет географических обобщений [201].

4.3.2. Оценка корреляционных связей между статистическими параметрами годового стока рек Украины. Известно, что ряды годового стока близлежащих рек характеризуются достаточно тесными корреляционными связями [78,90,124,158,188,200,201]. Следовательно, должна существовать связь и между статистическими параметрами годового стока. В работах Е.Г.Блохинова [20,21] установлены зависимости

между статистическими параметрами скоррелированных величин, подчиняющихся нормальному и трехпараметрическому гамма-распределению, которые представляются следующим образом

$$R_{\bar{X},\bar{Y}} = R_{X,Y} , \quad (4.24)$$

$$R_{Cvx,Cvy} = R_{X,Y}^2 , \quad (4.25)$$

$$R_{Csx,Csy} = R_{X,Y}^3 , \quad (4.26)$$

$$R_{Cs/Cvx,Cs/Cvy} = R_{X,Y}^3 , \quad (4.27)$$

где $R_{\bar{X},\bar{Y}}$; $R_{Cvx,Cvy}$; $R_{Csx,Csy}$; $R_{Cs/Cvx,Cs/Cvy}$ - коэффициенты линейной корреляции между статистическими параметрами двух рядов - x и y ;

$R_{X,Y}$ - коэффициент корреляции между двумя рядами - x и y .

Согласно рекомендациям С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля [117], влияние скоррелированности исходных рядов на качество объединения может быть учтено в случайной составляющей пространственной дисперсии рассматриваемого статистического параметра

$$\sigma_C^{2'} = \sigma_C^2 (1 - R_{Acp}) , \quad (4.28)$$

где $\sigma_C^{2'}$ - случайная составляющая дисперсии статистического параметра с учетом влияния скоррелированности; σ_C^2 - исходная случайная составляющая дисперсии статистического параметра.

Из (4.28) следует, что скоррелированность рядов снижает вклад случайной составляющей в пространственную дисперсию параметра.

В случае, когда корреляционная матрица объединенных совокупностей имеет очень большие размеры, подсчет среднего значения коэффициентов корреляции выполнить трудно. Упростить решение поставленной задачи возможно при построении пространственной корреляционной функции R_{LA} исследуемого параметра A . Расчет пространственной корреляционной функции выполнен с использованием нормированной структурной функции D_{LA} , связанной с корреляционной соотношением [95]

$$R_{LA} = 1 - D_{LA} \quad (4.29)$$

Полученные в результате расчетов зависимости вида $R_{LA} = f(L)$ аппроксимируется выражением

$$R_{LA} = e^{-\beta L} , \quad (4.30)$$

где β - показатель экспоненты, отражающий интенсивность снижения корреляционных связей между рядами с увеличением расстояния между объектами, вошедшими в объединенную совокупность;

L - расстояние между объектами, которое оценивается для каждой пары объектов i, j , по условным координатам пространственного положения объекта - x_i, y_i и x_j, y_j

$$L_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (4.31)$$

Значение β устанавливается графическим методом - как тангенс угла наклона прямой

$$\ln(R_{LA}) = -\beta L , \quad (4.32)$$

В соответствии с изложенной выше методикой были получены выражения для пространственных корреляционных функций, характеризующих изменение корреляционных связей между статистическими параметрами рядов годового стока рек Украины по мере увеличения расстояний между водосборами (рис.4.5). Установлено, что интенсивность снижения корреляционных связей

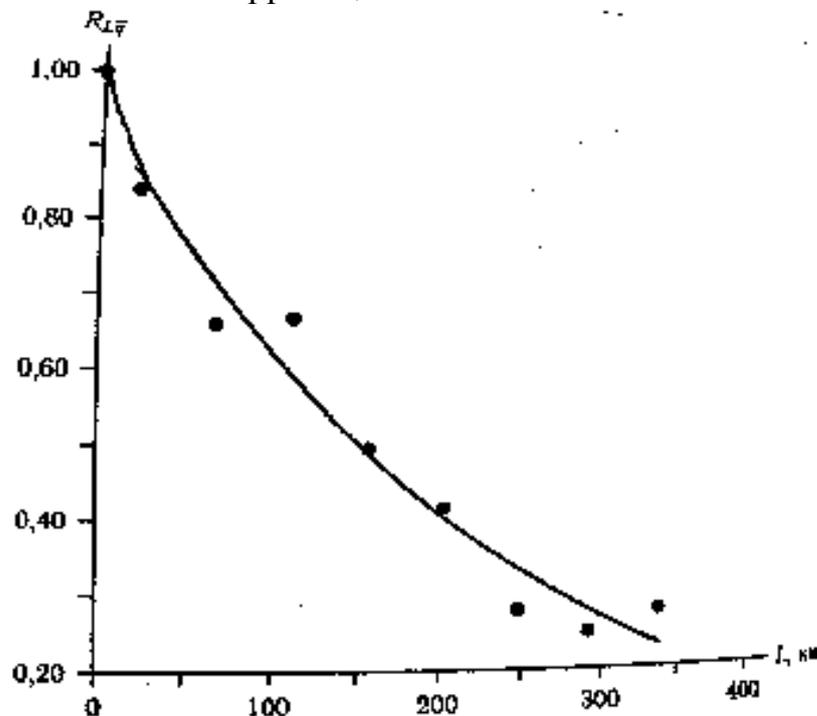


Рис.4.5 – Пространственная корреляционная функция средних арифметических значений годового стока рек Украины (район III)

● - рассчитанные значения, _____ - экспонента

между средними арифметическими значениями и коэффициентами вариации в пределах восточной Украины (район II) ниже, чем в западной (район I, см. рис.4.3)

$$\text{район I - } R_{L\bar{q}} = e^{-0.012L} ; \quad (4.33)$$

$$\text{район II - } R_{L\bar{q}} = e^{-0.004L} , \quad (4.34)$$

$$\text{район I - } R_{LCv} = e^{-0.025L} ; \quad (4.35)$$

$$\text{район II - } R_{LCv} = e^{-0.013L} ; \quad (4.36)$$

где L - расстояние, км;

$R_{L\bar{q}}, R_{LCv}$ - пространственные корреляционные функции, характеризующие связь между такими статистическими параметрами годового стока, как среднее арифметическое и коэффициент вариации.

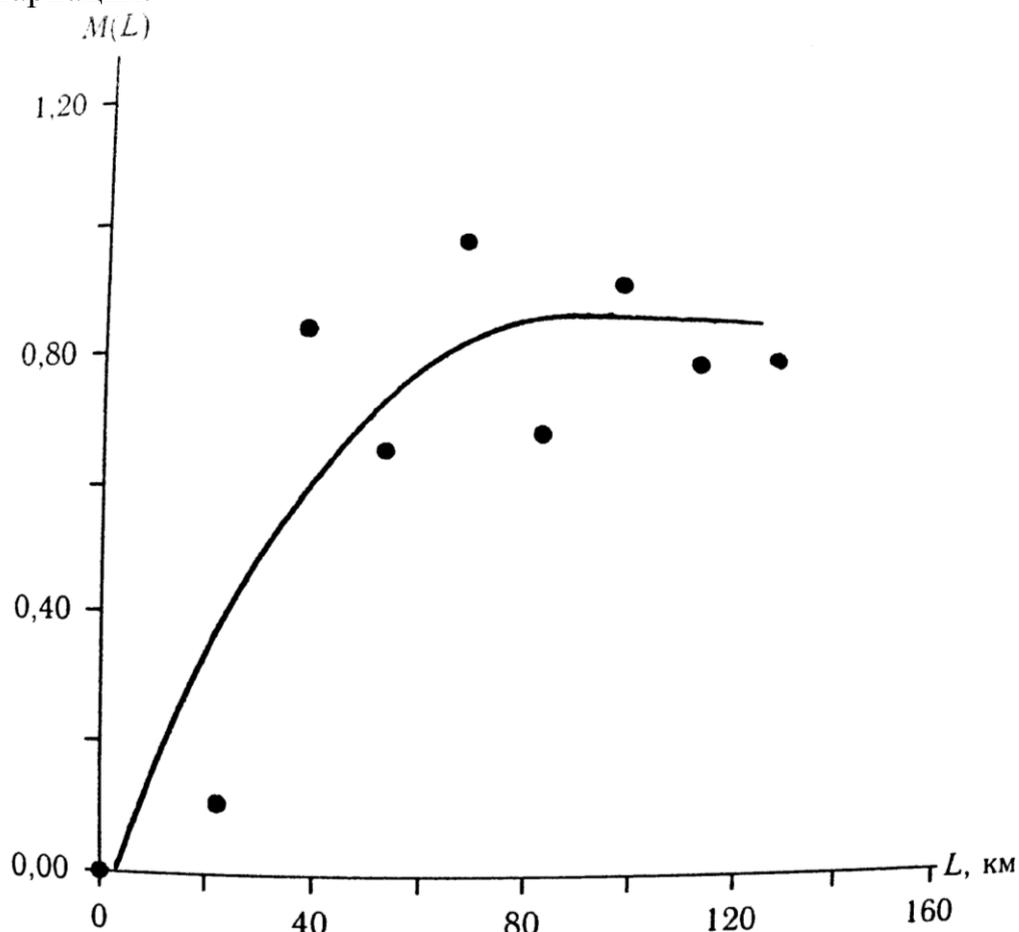


Рис.4.6 – Пространственная структурная функция коэффициентов автокорреляции годового стока рек Украины (район II)

● - рассчитанные значения, _____ - сглаженная функция

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в восточной части Украины корреляционные связи между рядами, а, следовательно, и между параметрами сохраняется даже для достаточно удаленных друг от друга водосборов. Это можно объяснить более выраженной континентальностью климата восточной части Украины, большей устойчивостью погодных условий по сравнению с разнообразием климатических условий и подстилающей поверхности территории правобережной (западной) части Украины. Что касается коэффициента автокорреляции годового стока $r(1)$, то наличием коррелятивных связей между исходными рядами годового стока при применении метода совместного анализа можно пренебречь, так как “насыщение” пространственной структурной функции [95,185,200], определяющей количество значимых ординат корреляционной функции наступает при увеличении расстояния между центрами тяжести водосборов до 40 – 60 км (рис.4.6). Аналогичная картина наблюдается при исследовании коэффициента асимметрии и отношения C_s/C_v .

4.3.3. Пространственное обобщение параметров внутрирядной связности рядов годового стока. При построении стохастических моделей стационарных временных рядов весьма часто применяются авторегрессионные модели [183]. Однако, в связи с ограниченностью исходной информации вопрос о признании так называемых “дальних связей” в рядах годовых значений речного стока остается открытым, поэтому в гидрологических расчетах наиболее распространены различные модификации процессов Маркова.

Первые модификации простой цепи Маркова исходили из нормальной корреляции между смежными значениями величин стока [117]. При этом в качестве оценки тесноты связи между предыдущими и последующими значениями стока использовался смешанный корреляционный момент. Для дискретной во времени случайной реализации длиной n степень внутрирядной связности определяется по формуле

$$r(1) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})}{\sigma_x^2 (n-1)}, \quad (4.37)$$

где x_i - член временного ряда стока;
 \bar{x} - среднее арифметическое;
 σ_x - стандарт исходного ряда.

Средние квадратические погрешности выборочных значений коэффициента $r(1)$ в гауссовском случае могут быть рассчитаны по выражению

$$\sigma_r = \frac{1 - r(1)^2}{\sqrt{n - 1}}, \quad (4.38)$$

а при наличии гамма-корреляции по формуле

$$\sigma_r = \frac{1 - r(1)^2}{\sqrt{n - 1}} \sqrt{1 + \frac{r(1)[4 + r(1)]}{[1 + r(1)]^2} C_V^2} \quad (4.39)$$

Формула (4.39) получена Е.Г.Блохиновым и О.В. Сармановым [20] для случая линейной гетероскедастичной гамма-корреляции. Формулы (4.38) и (4.39) соответствуют линейной корреляции смежных членов ряда, а точнее – линейному виду первых собственных функций ядра корреляционного уравнения. В тоже время известно, что задача построения двухмерного закона распределения по заданным одномерным плотностям не имеет однозначного решения. Вследствие этого получили распространение и другие подходы к заданию марковских последовательностей. Так, в [205-208] предложена нелинейная модель, учитывающая корреляцию между обеспеченностями смежных членов ряда. Максимально правдоподобная оценка коэффициента корреляции между функциями распределения (обеспеченностей) r_0 получается на основе применения функции правдоподобия к тому или иному двумерному закону распределения двух случайных величин u и v , равномерно распределенных в интервале $[0,1]$. В работе [29] для определения r_0 в качестве исходной модели была выбрана модель Е.Г. Блохинова и О.В. Сарманова, которая описывает марковский процесс двухпараметрическими априорными гамма-распределениями и линейной гетероскедастической корреляцией. Максимально правдоподобная оценка r_0 была получена путем решения уравнения вида

$$\frac{\partial \ln L}{\partial (r_0)} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} 3(2u_i - 1)(2v_i - 1) + \frac{5}{2} r_0 [3(2u_i - 1)^2 - 1] \cdot [3(2v_i - 1)^2 - 1]}{1 + 3r_0(2u_i - 1)(2v_i - 1) + \frac{5}{4} r_0^2 [3(2u_i - 1)^2 - 1] \cdot [3(2v_i - 1)^2 - 1]}, \quad (4.40)$$

где L - функция максимального правдоподобия; u_i - функция распределения предшествующего значения; v_i - функция распределения

последующего значения; r_0 - коэффициент тесноты связи между величинами u и v т.е. между функциями распределения. Решение (4.40) осуществляется численными методами.

На основе моделирования 50-ти тысячных рядов и численных экспериментов устанавливалась смещенность и эффективность статистических параметров $r(1)$ и r_0 в зависимости от объема выборки. Полученные нами результаты, а также дальнейшие исследования, выполненные в этом направлении М.В.Болговым и Д.Я. Ратковичем [189], позволили установить, что случайные ошибки выборочных коэффициентов, характеризующих корреляционные связи, весьма чувствительны к выбору типа модели. Систематические ошибки выборочных оценок $r(1)$ значительны как для линейных, так и нелинейных моделей. При использовании линейных моделей зависимость $\sigma_{r(1)}$ от коэффициента вариации Cv более выражена, чем для нелинейных. Исследованные при помощи метода Монте-Карло статистические свойства максимально правдоподобных оценок r_0 показывают, что использование метода наибольшего правдоподобия уменьшает систематические и случайные погрешности расчета выборочных оценок этого параметра по сравнению с традиционно используемым методом моментов. Сведения о параметре r_0 необходимы для моделирования рядов на основе марковской модели с априорным трех-параметрическим гамма-распределением и нелинейной корреляцией между смежными членами ряда. Для практического использования И.О. Сармановым [206] предложена следующая формула

$$r(1) = \frac{3r_0}{\pi} - 0,12Cv^{\frac{3}{2}}r_0^{0,75} \quad (4.41)$$

Из (4.41) следует, что параметр r_0 функционально связан с коэффициентом автокорреляции $r(1)$, однако при оценивании по короткому ряду $r(1)$ и r_0 имеют разные статистические свойства и, поскольку r_0 не зависит от коэффициента вариации, в рамках нелинейной стохастической модели более целесообразно применять коэффициенты корреляции между функциями распределения.

Ввиду того, что выборочные оценки $r(1)$ и r_0 соизмеримы со случайными отклонениями, обусловленными ограниченным объемом исходной информации по стоку, использование их для целей статистического моделирования или непосредственно в гидрологических расчетах недопустимо [180,201]. В то же время практические рекомендации по применению $r(1)$ и r_0 разработаны недостаточно, особенно по отношению

к параметру r_0 . Оптимальным вариантом при назначении этих параметров является пространственное их обобщение в пределах однородной территории. Наиболее известным является групповое объединение коэффициентов автокорреляции по различным регионам СССР, выполненное А.В. Рождественским, которое впоследствии было включено в СНИП 2.01.14–83. Согласно этому районированию для всей территории Украины и Молдовы рекомендован общий коэффициент автокорреляции $r(1) = 0,22$. Установлена обратная зависимость коэффициента $r(1)$ от нормы годового стока, однако, при этом отмечается, что значительное влияние на коррелированность стока могут оказывать такие местные факторы, как заболоченность, озерность, карст [185]. Связь параметра $r(1)$ с модулями стока является достаточно слабой и носит характер тенденции.

Следующим этапом в пространственных обобщениях коэффициента автокорреляции явилось районирование $r(1)$ и r_0 , выполненное по 297 рядам с продолжительностью наблюдений, превышающими 50 лет [27]. В результате было выделено 15 статистически однородных районов, причем границы районов как для r_0 , так и $r(1)$ совпадают. Средний коэффициент автокорреляции по Украине равен 0,25 (без учета закарстованных территорий).

Более подробно районирование коэффициента $r(1)$ представлено нами в работе [28] по 67 рядам годового стока с периодом наблюдений с 1947 по 1985 гг. и диапазоном площадей от 49 км^2 до 25600 км^2 . Попытки установить зависимости коэффициентов автокорреляции от таких характеристик климата как нормы годовых осадков и нормы максимально возможного испарения, а также от ландшафтно-географических характеристик не дали положительного результата. А.В. Рождественским было высказано предположение о влиянии естественного и искусственного регулирования стока за счет передачи запасов влаги от года к году при опосредованном влиянии бассейновых факторов (озерности, заболоченности, залесенности). В связи с этим исследовались данные по грунтовому стоку рек, рассчитанные приближенным методом [16,17]

$$q_{ГР} = \frac{q_{З,\min} + q_{Л,\min}}{2}, \quad (4.42)$$

где $q_{З,\min}$ - средний минимум расхода воды за 30 суток зимнего периода;
 $q_{Л,\min}$ - средний минимум расхода воды за 30 суток открытого русла.

Нами показано [271,237], что скоррелированность в рядах грунтового стока практически всегда превышает скоррелированность в рядах годового стока и коэффициент линейной связи между параметрами $r(1)$ для того и

другого вида стока превышает 0,7, что подтверждает гипотезу о влиянии грунтовой составляющей на величину коэффициентов автокорреляции в рядах годового стока.

Из табл. 4.2 видно, что коэффициенты автокорреляции $r(1)$ уменьшаются по мере снижения доли грунтовой составляющей в питании рек.

Таблица 4.2 - Результаты районирования коэффициента автокорреляции годового стока рек Украины

№	Район	$r(1)_{cp}$	Доля случайной составляющей в пространственной дисперсии параметра, %	$\sigma_{r(1)_{cp}}$	Доля подземного питания в норме годового стока, %
1	Провинция Карпат	0,15	100	0,035	20,0
2	Волыно-Подольский артезианский бассейн	0,35	100	0,034	38,0
2а	Северо-западная часть Волыно-Подольского артезианского бассейна (рр. Выжевка, Турья, Стоход)	0,21	100	0,090	11,0
2б	левобережные притоки Днестра, верховья Западного Буга и Иквы (область разгрузки карста)	0,55	100	0,027	50,0
3	Провинция Украинского кристаллического щита, Днепровско-Донецкий артезианский бассейн	0,28	100	0,039	16,0
3а	Бассейны рр. Самара, Базавлук, Конка	0,10	100	0,058	10,0
4	Донбасс, Приазовье	0,30	69	0,118	25,0
5	Причерноморский артезианский бассейн	0,10	100	0,096	5,0
6	реки Северной и Центральной Молдовы	0,48	100	0,0735	16,0

Границы полученных районов соответствуют гидрогеологическому районированию [5,6,51-52,115,174-175], однако в пределах этих районов возможно выделение подрайонов. Например, в пределах района 2 (Волыно-Подольский артезианский бассейн) выделяются два подрайона (рис.4.7). Основная часть подземного стока рассматриваемого артезианского бассейна формируется в районе Львовской мульды. В верховьях Западного Буга и левобережных притоков Днестра подземные воды связаны с трещиноватыми

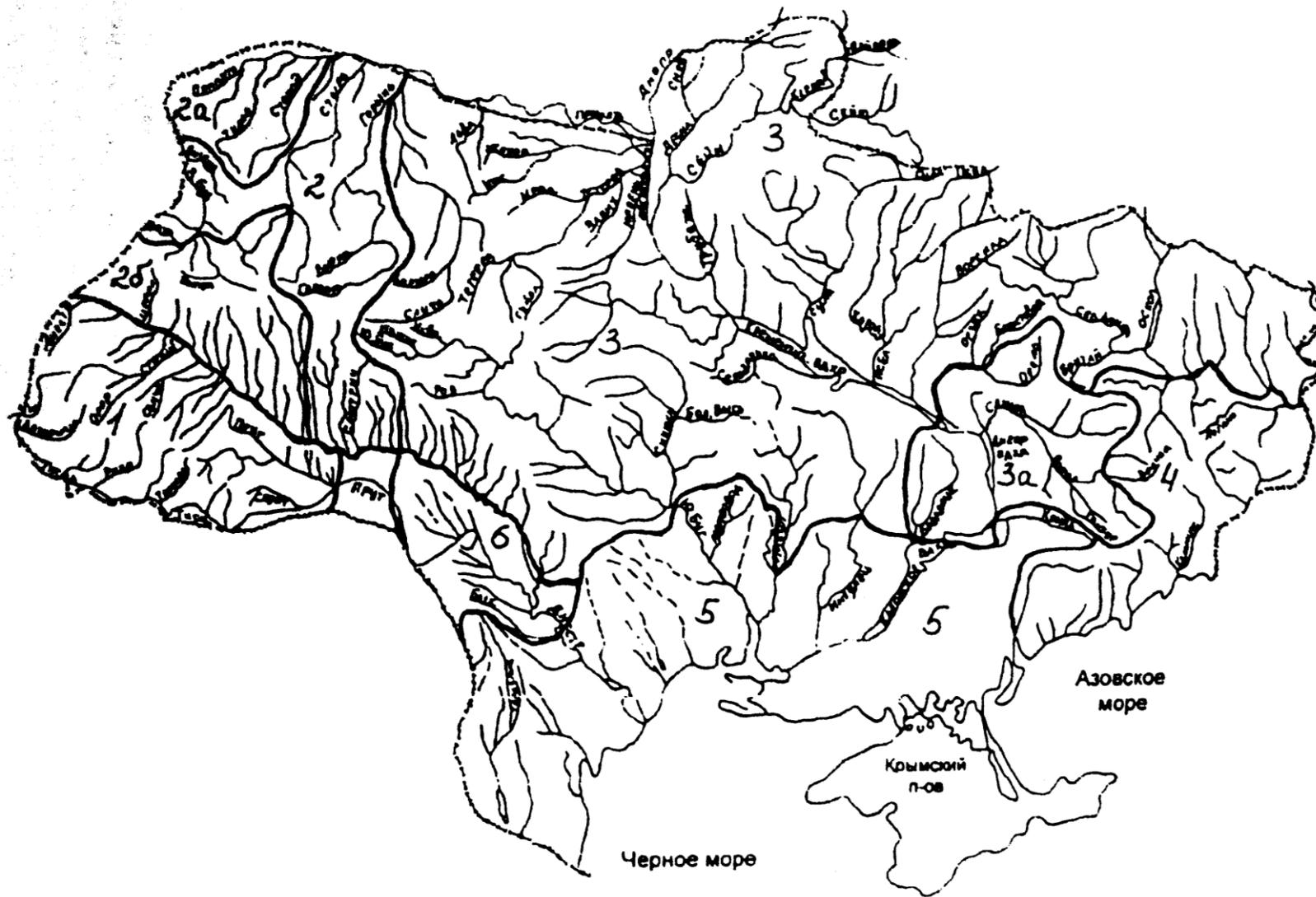


Рис.4.7 Карта – схема районирования территории Украины по коэффициенту автокорреляции годового стока

и закарстованными породами мергельно-меловой толщи верхнего мела. Выход напорных вод в виде родников часто служит источником питания поверхностных водотоков [174,219]. Среднегодовое количество осадков составляет здесь 60 мм, уменьшаясь к северо-западу и востоку до 20 мм. Водосборы рек Выжевка, Турья, Стоход имеют значительно меньшее грунтовое питание, чем остальные реки Волыно-Подольского артезианского бассейна, что обусловлено слабым эрозионным врезом в подстилающую поверхность. Соответственно, коэффициенты автокорреляции в выделенных подрайонах резко отличаются друг от друга. Поскольку вклад случайной составляющей в общую пространственную дисперсию параметра как для района, так и подрайонов составляет 100%, правомерность выделения подрайонов определялась выполнением условия (4.20).

4.3.4. Пространственное обобщение коэффициентов вариации и отношения C_s/C_v рядов годового стока. Как известно, основной причиной колебаний годового стока является изменение от года к году величин климатических факторов – осадков и максимально возможного испарения [54]. Таким образом, согласно своей физической природе характеристика многолетней изменчивости колебаний годового стока – коэффициент вариации C_v – может быть представлена в виде карты изолиний. Однако, значения C_v определяются в значительной мере не только климатическими факторами, но и факторами подстилающей поверхности, которые можно объединить под названием “факторов естественной зарегулированности”. Определяющим среди них являются запасы подземных вод, которые уменьшаются в соответствии с увеличением глубины залегания грунтовых вод, а в пределах одного и того же гидрологического района – с увеличением емкости речного бассейна, принимаемой пропорциональной площади водосбора. Рекомендуемые региональные формулы для расчета коэффициентов вариации при отсутствии данных наблюдений содержат, как правило, две составляющие – норму годового стока, как количественное выражение результата взаимодействия климатических факторов, и площадь водосбора, как интегральный показатель факторов подстилающей поверхности. Дело в том, что при малых площадях водосборов роль факторов подстилающей поверхности усиливается, в связи с чем коэффициенты вариации малых и средних рек могут существенно отличаться от зональных значений.

На первом этапе пространственного обобщения была принята гипотеза относительно общности не только кривой распределения, но и отдельных параметров распределения. В качестве основы районирования было принято физико-географическое районирование территории Украины [5,240]. В результате обобщения было получено 17 статистически

однородных районов, в пределах которых возможно использовать одновременно осредненные средние арифметические значения, коэффициенты вариации и асимметрии. Однако, качество осреднения для такого параметра как среднее арифметическое значение годового стока оказалось недостаточным – случайная составляющая дисперсии оказывалась близкой к 50%, что позволило принять решение о нецелесообразности районирования среднего арифметического значения годового стока. Выполненное в дальнейшем районирование коэффициента вариации и отношения C_s/C_v производилось путем расширения границ районов, полученных на основе принятия гипотезы об общности всех параметров распределения. Обоснование дальнейшего расширения пределов обобщения (путем последовательного присоединения районов) контролировалась при помощи анализа изменений критерия качества объединения σ_{CP}^2 , определяемого по (4.19), и выполнением условия (4.18). Установлено, что районирование коэффициентов вариации целесообразно в тех случаях, когда рассматриваются водосборы с площадями больше второй критической, что в среднем по территории Украины соответствует 1000 км^2 . Общее число районов и подрайонов равно 14. Широтная зональность в пространственном распределении осредненных по районам значений C_v выражена недостаточно четко (рис.4.8). Как и при рассмотрении коэффициентов автокорреляции, полученные на основе статистических обобщений районы можно увязать с гидрогеологическим районированием (табл.4.3). Именно различный вклад грунтового питания в формирование годового стока рек обуславливает необходимость выделения районов в пространственном распределении коэффициентов вариации. При этом в пределах одной и той же природной зоны с одинаковыми климатическими условиями может быть выделено несколько районов. Примером может служить зона смешанных лесов Украинской Полесской провинции, на территории которой выделены район (2), соответствующий Волыно-Подольскому артезианскому бассейну, район, соответствующий гидрогеологической области трещинных вод Украинского кристаллического щита (3), а также (4а), относящийся к Днепровско-Донецкому артезианскому бассейну. Все выделенные районы характеризуются различными условиями формирования подземного притока в реки и, как следствие, различными долями грунтового питания. В некоторых случаях в пределах одного района выделяются подрайоны. Так, в пределах района 2, соответствующего Волыно-Подольскому

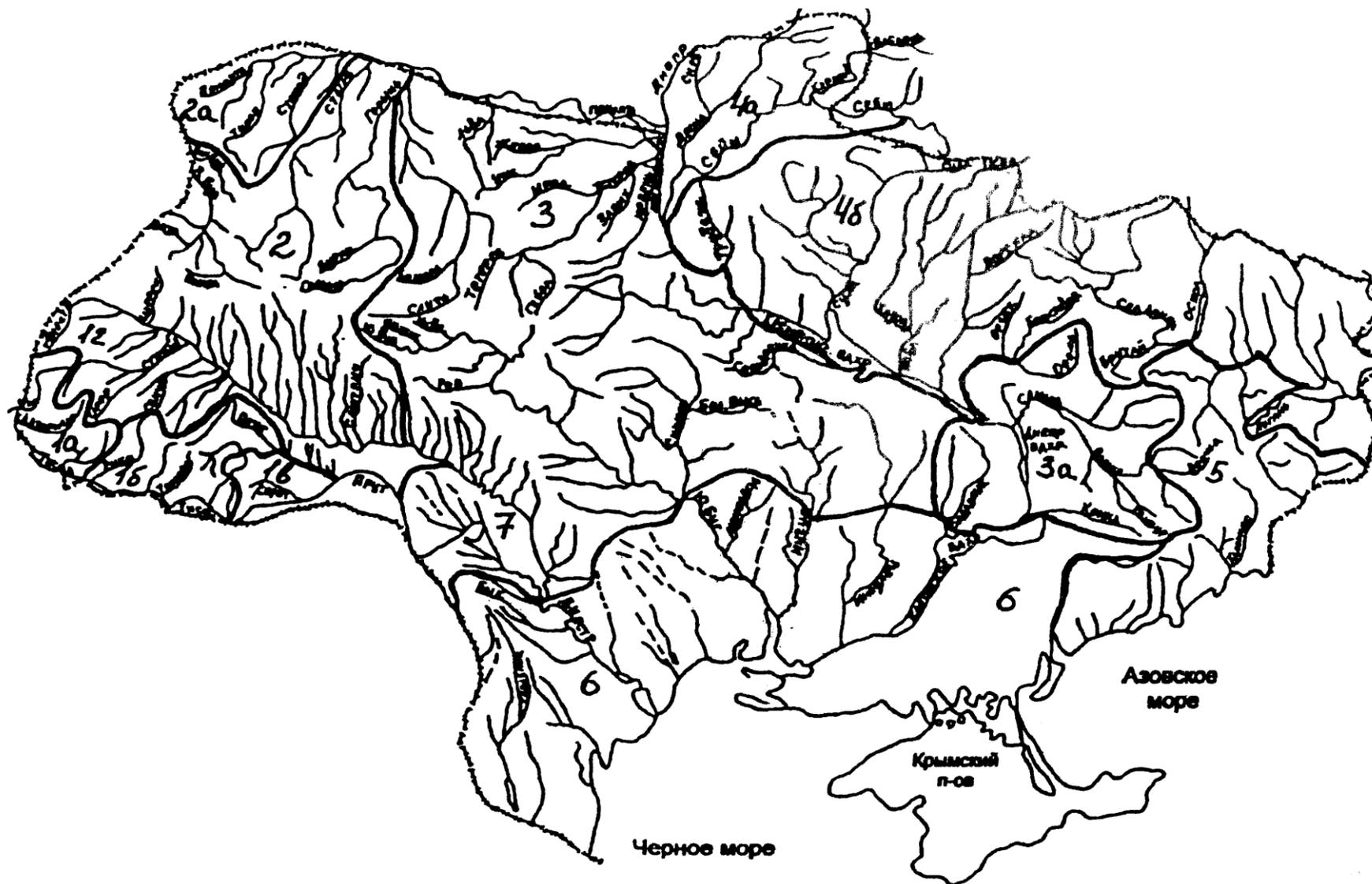


Рис.4.8 Карта – схема районирования территории Украины по коэффициенту вариации годового стока

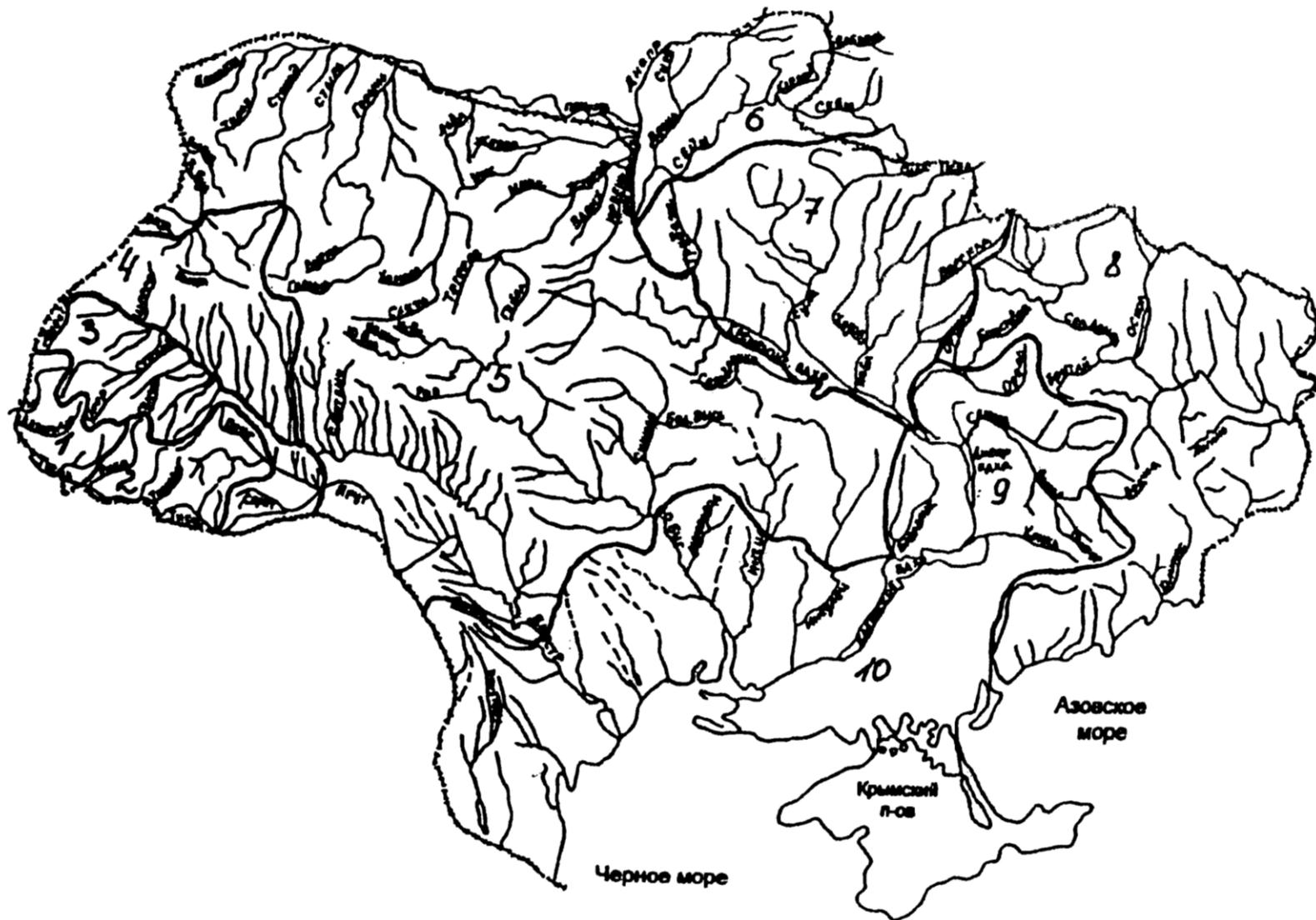
Таблица 4.3 - Результаты районирования коэффициента вариации годового стока рек Украины

№	<i>Район</i>	Среднее значение параметра <i>C_{вср}</i>	Доля случайной составляющей в пространственной дисперсии параметра, %	Относительная средняя квадратическая погрешность, %
1а	Западная часть бассейна р.Тиссы	0,32	80,7	6,02
1б	Восточная часть бассейна р.Тиссы и верховья р.Прут	0,25	87,0	5,90
1в	Бассейны рр.Сирет,Белый Черемош, Путила	0,42	100	7,01
1г	реки горной части бассейна р.Днестр	0,32	100	11,1
2	Волыно-Подольский артезианский бассейн (рр.Стырь, Горынь, Западный Буг, левобережные притоки р.Днестр)	0,31	71,1	7,65
2а	Северо-западная часть Волыно-Подольского артезианского бассейна (рр.Выжевка,Турья, Стоход)	0,58	66,5	10,9
3	Гидрогеологическая область трещинных вод Украинского кристаллического щита (за исключением бассейна р.Самара, Базавлук, Конка)	0,49	100	4,44
3а	Бассейны рр.Самара, Базавлук,Конка	0,80	100	4,00
4а	Днепровско-Донецкий артезианский бассейн (Восточное Полесье)	0,35	100	1,00
4б	Днепровско-Донецкий артезианский бассейн (Левобережная лесостепная область)	0,55	80,0	1,1
5	Донбасс, Приазовье	0,47	63	15,0
5а	Приазовье	0,48	100	3
6	Причерноморский артезианский бассейн	1,01	61	15,0
7	реки Северной и Центральной Молдовы	0,56	100	4,41

артезианскому бассейну, выделена в виде подрайона 2а его северо-западная часть. Водосборы этого подрайона (рр. Турья, Выжевка, Стоход) имеют значительно меньшее грунтовое питание по сравнению с другими реками района, вследствие малой величины эрозионного вреза русел в подстилающую поверхность, и, следовательно, получают значительно меньшее грунтовое питание (11%) при одних и тех же климатических и гидрогеологических условиях [52,174]. С другой стороны, гидрогеологический район Днепровско-Донецкого артезианского бассейна (4) при районировании по коэффициенту вариации разделен на два подрайона, вследствие значительного различия в климатических условиях формирования стока.

В гидрогеологической провинции Карпат, где основная роль в формировании годового стока принадлежит осадкам, нельзя выделить один район, в пределах которого можно было бы рекомендовать определение коэффициента вариации по осредненному значению, соблюдая требуемую точность. Параметр C_v подлежит районированию только в том случае, если исследуемая территория будет разделена на четыре района. Первому району принадлежит западная часть бассейна р.Тиссы (в пределах территории Украины), включая р. Иршава; второму - восточная часть бассейна р.Тиссы (в пределах территории Украины) и верхнее течение р.Прут; третий район формируют бассейны рр.Сирет, Путила, Белый Черемош; к четвертому относится горная часть бассейна р. Днестр. Различия между первым (1а) и вторым районами (1б) обусловлены различиями в высотах местности. Второй район характеризуется наибольшим увлажнением, в связи с чем средний коэффициент вариации годового стока принимает наименьшее значение - 0,25. По сравнению с бассейном р.Тиссы, в горной части бассейна р.Днестр (район 1г) многолетняя изменчивость возрастает (осредненное значение коэффициента вариации равно 0,32), что связано с уменьшением общего количества выпадающих осадков на северо-восточном макросклоне Карпат по сравнению с юго-западным. Бассейны рр.Сирет, Белый Черемош, Путила расположены в глубине Карпатских Гор и, соответственно, получают меньшее количество осадков по сравнению с другими районами. Эта часть Карпатской гидрогеологической провинции характеризуется относительно высокими для зоны достаточного увлажнения значениями коэффициента вариации годового стока ($C_v = 0.42$).

При применении метода совместного анализа данных, предложенного С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем, к обоснованию районирования C_s / C_v получено 10 районов (табл.4.4, рис.4.9),



4.9 Карта – схема районирования территории Украины соотношению C_s / C_v

Таблица 4.4 - Результаты районирования отношения C_s / C_v для годового стока рек Украины (использованы оценки параметров, рассчитанных по методу моментов)

№	Район	Среднее значение параметра C_s / C_v	Доля случайной составляющей в пространственной дисперсии параметра, %	Относительная средняя квадратическая погрешность, %
1	Западная часть бассейна р.Тиссы	1,4	100	9,59
2	Восточная часть бассейна р.Тиссы и верховья р.Прут	0,6	100	25,1
3	Реки горной части бассейна р.Днестр	2,0	93,0	22,5
4	Левобережные притоки р.Днестр до р. Стрыпа	3,0	100	11,6
5	Лесная и лесостепная части правобережной Украины и Молдовы	1,5	100	15,0
6	Восточная часть Украинского Полесья	3,00	100	16,7
7	Бассейны рек Трубеж, Сула, Псел и Ворскла	1,00	100	9,50
8	Бассейны рек Приазовья и р. Северский Донец	1,50	100	9,33
9	Бассейны рр.Орель, Самара, Базавлук,Конка	1,27	84	10,3
10	Реки степной части Молдовы и Причерноморья	1,7	52	23,0

Установлено, что наименьшими значениями C_s / C_v характеризуются ряды годового стока рек восточной части бассейна р.Тиссы (район 2), наибольшими – левобережные притоки Днестра до впадения р.Серет,включительно, а также реки бассейна р.Десна (районы 4 и 6). Для большей части рек Украины отношение C_s / C_v , рассчитанное на основе метода моментов, можно принять равным 1,5 (районы 5 и 8). Осреднение C_s / C_v в пределах Причерноморской низменности выполнено с низким качеством, так как доля случайной составляющей объединения составляет только 52%.

Результаты пространственных обобщений характеристик годового стока на основе методов статистического анализа выполнены для территории Украины впервые и рекомендуются к применению в области гидрологических расчетов годового стока неизученных рек, а также рек с существенно нарушенным хозяйственной деятельностью режимом.

РАЗДЕЛ 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОДОВОГО СТОКА РЕК УКРАИНЫ В УСЛОВИЯХ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Методология гидрологических расчетов базируется на наблюдаемых временных рядах стока. При этом подразумевается сохранение эргодичности процесса и репрезентативность материалов наблюдений. Однако водные ресурсы Украины, особенно в южных ее регионах, подвергаются значительным водохозяйственным преобразованиям с существенной динамикой водопотребления [80,114,179,248]. Поэтому ряды бытового (преобразованного деятельностью человека) годового стока уже не могут рассматриваться как реализации эргодического случайного процесса, а, значит, к ним неприменимы стандартные статистические методы. Для изучения водного режима рек в условиях антропогенной деятельности необходимо построение математической модели стока, позволяющей имитировать состояние водных ресурсов в зависимости от вида водохозяйственных преобразований. В последние десятилетия к проблеме оценки стока в условиях водохозяйственных преобразований, таких как создание искусственных водоемов, забор воды из местных водотоков и переброска стока, осушительные и оросительные мелиорации прибавилась проблема оценки влияния на водные ресурсы изменений глобального климата.

Решение поставленных проблем предполагает реализацию следующих этапов научно-исследовательской работы:

- оценка характеристик стока в естественных (ненарушенных хозяйственной деятельностью) условиях его формирования;
- оценка характеристик стока в условиях проведения водохозяйственных мероприятий (внутри отдельных водосборов);
- оценка характеристик стока в результате возможных изменений климата;
- обобщение результатов исследований с целью разработки модели расчета характеристик стока в условиях антропогенного влияния, включая как водохозяйственные преобразования на водосборах (внутрибассейновые антропогенные факторы), так и изменения климата.

Основой подобного рода исследований является детальное изучение закономерностей пространственно-временного распределения характеристик стока. В связи с тем, что наблюдения за стоком в естественных условиях его формирования ограничены во времени, в ряде регионов Украины мы столкнулись с проблемой оценки характеристик естественного годового стока. Традиционные методы расчета характеристик стока “при недостаточности и отсутствии данных наблюдений” [158,181,201,203] оказались неприемлемыми, в связи с чем нами была разработана методика оценки характеристик годового стока на основе метода водно-теплового баланса с использованием метеорологических данных (см. разделы 1,2). Впервые для территории Украины было выполнено пространственное обобщение статистических параметров, определяемых по наблюдаемым данным с малой степенью достоверности (см. раздел 4), что открыло возможности для создания имитационных стохастических моделей годового стока в условиях хозяйственной деятельности на основе заданных параметров годового стока в естественных условиях.

5.1. ОБЗОР МЕТОДОВ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОДОВОГО СТОКА

В основе большинства инженерно-гидрологических методов расчета лежит представление о вероятностном характере колебаний водности рек и других составляющих водного баланса. Существующая методология решения гидрологических задач основывается на представлении о стационарности многолетних колебаний стока, а основные математические подходы развиваются на базе теории стационарных случайных процессов. В частности, стохастическая теория многолетних колебаний стока широко использует в качестве математических моделей процессы (цепи) Маркова.

Случайный процесс $X(t)$ обладает марковским свойством, если $P(x(t) / x(t_i), i = 0, 1, \dots)$ - условное распределение вероятностей значений $x(t)$, при условии, что заданы значения $x(t_i)$ в предыдущие моменты времени $t < t_i, i = 0, 1, 2, \dots$ зависит только от значения $x(t_0)$ в последний момент

$$P\{x(t) / x(t_i), i = 0, 1, \dots\} = P\{x(t) / x(t_0)\}, \quad (5.1)$$

т.е. при фиксированном настоящем будущее марковского процесса не зависит от его прошлого. Это означает, что вся информация о прошлом для такого процесса заключается в его значении в последний момент времени.

Однако отсюда не следует, что будущее не коррелирует с более далеким прошлым. Соответствующая корреляционная функция имеет вид экспоненты $\exp\{\alpha t\}$. Для дискретного марковского процесса случайную последовательность (цепь Маркова), отвечающую данному выше определению, иногда еще называют простой цепью Маркова, для того, чтобы отличить ее от более общей (сложной), для которой зависимость от прошлого описывается не одним предыдущим значением $x(t_0)$, а двумя, тремя и т.д. Методы решения уравнения Маркова для случайных величин с одномерными законами распределения из семейства кривых К.Пирсона были разработаны в 50-е годы О.В.Сармановым [209-211].

Ряды годового стока не могут рассматриваться как последовательности независимых случайных величин: средняя длительность серий маловодных и многоводных лет, а также повторяемость длительных серий превосходят значения, отвечающие этой модели. Такое отклонение от структуры независимых последовательностей характерно при введении положительной корреляции. В то же время анализ автокорреляционных функций рядов годового стока показал, что их очертание в первом приближении удовлетворительно описывается простой цепью Маркова [19-21,95,99, 171,188-189,200,205-208,209-211,212,258,259,276,280].

Различные модификации описания простой цепи Маркова приводят к различным результатам водохозяйственного расчета даже при одинаковом значении их числового параметра – коэффициента автокорреляции. Поэтому для описания многолетних колебаний стока следует рекомендовать такую из этих модификаций, которая лучше отвечает наблюдаемым в природе закономерностям колебаний стока и не приводит к существенным ошибкам в результате водохозяйственного расчета. Для сопоставления материалов натуральных наблюдений со стохастическими моделями привлекаются двумерные плотности распределения вероятностей. С целью получения искомым эталонных соотношений, отвечающих рассматриваемым стохастическим моделям, широко используется метод Монте-Карло.

В простой цепи Маркова распределение вероятностей последующей случайной величины зависит лишь от значения непосредственно предшествующей величины; степень зависимости (при заданном характере связанности) определяется величиной коэффициента корреляции между смежными членами ряда.

Использование простой цепи Маркова в качестве стохастической модели стока предполагает степенной закон затухания

коэффициента корреляции между стоком последовательных лет

$$r_{\tau} = r_1^{\tau}, \quad (5.2)$$

где r_{τ} - коэффициент корреляции между величинами стока в годы i и $i + \tau$;

τ - число лет.

Величина коэффициента корреляции между стоком непосредственно смежных лет $r_1 = r(1)$ предопределяет в этом случае очертание всей автокорреляционной функции, чем однако не достигается исчерпывающее описание характера связи между последовательными членами ряда. В такой последовательности распределение вероятностей какого-либо члена ряда (условное распределение) зависит от величины предшествующего ему члена. Условное распределение вероятностей может отличаться как параметрами, так и типом от безусловного распределения, справедливого для совокупности всех членов ряда.

Совокупность условных распределений образует двумерное распределение вероятностей, которое и является исчерпывающей характеристикой связи между членами коррелированной последовательности, представляющей простую цепь Маркова. Геометрической интерпретацией двумерного распределения является поверхность над координатной плоскостью, по одной из осей которой откладывается величина предыдущего члена, а по другой – последующего; ординаты поверхности равны плотности вероятности. При одном и том же очертании автокорреляционной функции можно сконструировать неограниченное количество вариантов двумерного распределения – модификаций описаний простой цепи Маркова; ниже рассматривается несколько характерных модификаций, которые применяются для описания колебаний стока.

Модель 1 предполагает отсутствие корреляции между членами ряда – последовательность независимых случайных величин. Если ряд стока рассматривается как выборка независимых случайных величин, то соответствующие значения обеспеченности стока являются независимыми случайными величинами, равномерно распределенными в интервале от 0 до 1. В этом случае все условные распределения вероятностей совпадают с безусловным.

Модель 2 рассматривает корреляцию между нормально-распределенными случайными величинами (с последующим переходом к гамма – распределенным величинам). В данной модификации последовательность обеспеченностей нормально-распределенных коррелированных величин принимается за последовательность обеспеченностей случайных величин, имеющих гамма-распределение.

При известном значении предшествующего x члена цепи Маркова условное распределение последующего члена y является, так же как и безусловное распределение величин x , нормальным

$$f(y/x) = \frac{1}{\sigma_{y/x} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(y - m_{y/x})^2}{2\sigma_{y/x}^2} \right] \quad (5.3)$$

с условным математическим ожиданием, которое изменяется по линейному закону в зависимости от величины предшествующего члена

$$m_{y/x} = \bar{x}_{i+1/i} = \bar{x} + r_H (x_i - \bar{x}) \quad (5.4)$$

и условным стандартом

$$\sigma_{y/x} = \sigma_{i+1/i} = \sigma \sqrt{1 - r_H^2}, \quad (5.5)$$

где $f(x_{i+1/i})$ или $f_{y/x}$ условная плотность вероятностей случайной величины $y = x_{i+1}$; $m_x = \bar{x}$ - безусловное математическое ожидание распределения случайной величины x ; σ - безусловный стандарт распределения случайной величины x ; r_H - коэффициент корреляции между смежными членами ряда нормально-распределенных величин.

Выражения (5.4) и (5.5) определяют линейность корреляции и независимость условного стандарта от величины предшествующего члена (гомоскедастичность). Однако это является, априори, справедливым только для нормально-распределенных случайных величин, а для гамма - распределенных нарушается как линейность корреляции, так и гомоскедастичность условного распределения; степень нелинейности корреляции возрастает с увеличением коэффициента вариации безусловного распределения.

Модель 3 рассматривает корреляцию между случайными величинами, имеющими гамма - распределение, с применением аппарата гамма - корреляции (по Е.Г.Блохинову-О.В.Сарманову [20]). В гидрологических приложениях безусловная плотность гамма-распределенных величин x записывается в таких обозначениях

$$p(x) = \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-\gamma x}, \quad (5.6)$$

где параметр γ связан с коэффициентом вариации C_v соотношением

$$\gamma = \frac{1}{C_v^2} \quad (5.7)$$

Для плотности (5.6) безусловная двумерная и условная плотности выглядят следующим образом:

$$f(x, y) = p(x)p(y) \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} r^k L_k^{\gamma-1}(\gamma x) L_k^{\gamma-1}(\gamma y) \right], \quad (5.8)$$

$$f(y/x) = p(y) \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} R^k L_k^{\gamma-1}(\gamma x) L_k^{\gamma-1}(\gamma y) \right], \quad (5.9)$$

при $\lambda_k = k\lambda$, $k = 1, 2, \dots$, $\lambda > 0$,

где $y = x_{i+1}$; $L_k^{\gamma}(x)$ - полиномы Лагерра; $R = \exp(-\lambda)$ - коэффициент корреляции.

Как и в рассматриваемом выше нормальном распределении варьирующих величин, корреляция является линейной и условное математическое ожидание определяется формулой (5.4). Стандарт условного распределения при использовании аппарата гамма-корреляции соответственно равен

$$\sigma_{y/x} = \sigma_{i+1/i} = \sigma \sqrt{(1-r_r)^2 + 2x_i r_r (1-r_r)}, \quad (5.10)$$

где r_r - коэффициент корреляции гамма - распределенных величин.

Условный коэффициент асимметрии принимает значение

$$C_{s_{y/x}} = \frac{2C_v \left[(1-r_r)^3 + 3R(1-r_r)^2 x_i \right]}{\left[(1-r_r)^2 + 2R(1-r_r)x_i \right]^{3/2}}, \quad (5.11)$$

условный эксцесс -

$$E_{y/x} = \frac{6C_v^2 \left[(1-r_r)^4 + 4r_r(1-r_r)^3 x_i \right]}{\left[(1-r_r)^2 + 2r_r(1-r_r)x_i \right]^2} \quad (5.12)$$

Модель 4 использует корреляцию между случайными величинами, имеющими гамма - распределение, с применением приближенного приема корреляции (по С.Н.Крицкому и М.Ф.Менкелю [120,121]). Приближенный прием корреляции гамма - распределенных величин исходит из допущений, что условное распределение является, так же как и безусловное, гамма - распределением, причем условный стандарт связан с безусловным тем же соотношением (5.5), что и при нормальном распределении случайных величин.

Перечисленные модификации описаний простой модели Маркова исходят из корреляции между смежными значениями случайных величин

(в данном случае среднегодовых расходов воды). При этом влияние предшествующего члена на распределение вероятностей последующего (условное распределение) оказывается тем большим, чем сильнее отклоняется предшествующий член от среднего значения.

Однако можно представить и другой принцип конструирования цепи Маркова для описания стоковых рядов, опирающийся на наличие корреляции между обеспеченностями смежных членов ряда; при этом математическое ожидание условного распределения вероятностей последующего члена будет изменяться в той мере, в какой значение обеспеченности предшествующего члена отклоняется от медианы; корреляция будет связывать случайные величины, распределенные равномерно в интервале от нуля до единицы. Особенностью такого рода корреляции является то, что структура последовательности обеспеченностей случайных величин не зависит ни от типа их распределения, ни от числовых значений параметров этого распределения. Таким образом, модель 5 применяет корреляцию между обеспеченностями (равномерно распределенными случайными величинами).

Пусть x и y - случайные величины, имеющие каждая равномерное распределение в промежутке $[-1, 1]$ и соответственно плотности

$$f_1(x) = \frac{1}{2}, \quad f_2(x) = \frac{1}{2} \quad (5.13)$$

Требуется построить двумерную плотность $f(x, y)$ в квадрате $[-1 \leq x; y \leq 1]$ с учетом заданного коэффициента корреляции r_0 . Искомая плотность представлена в виде разложения по полиномам Лежандра. Полиномы Лежандра определяются формулой Родрига

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} \left[(x^2 - 1)^n \right]; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5.14)$$

В частности,

$$P_0(x) = 1, \quad P_1(x) = x, \quad P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1) \quad (5.15)$$

Если ограничиться в билинейном разложении по системе ортонормированных полиномов первыми тремя членами, двумерная плотность запишется в виде:

$$f(x, y) = \frac{1}{4} \left[1 + 3r_0xy + \frac{5}{4}r_0^2 (3x^2 - 1)(3y^2 - 1) \right], \quad (5.16)$$

где r_0 - коэффициент корреляции равномерно распределенных в $[-1,1]$ случайных величин.

В [212] показано, что разложение (5.16) сохраняет вероятностный смысл при выполнении следующего условия

$$-0,55 \leq \lambda \leq 0,55 \quad (5.17)$$

Для построения двумерного закона распределения равномерно-распределенных случайных величин в квадрате $0 \leq u, v \leq 1$ (обеспеченностей) необходимо сделать линейную замену переменных $x = 2u - 1, y = 2v - 1$. Плотность $f(u, v)$ запишется в виде

$$f(u, v) = f(P_{i+1}, P_i) = 1 + 3\lambda(2u - 1)(2v - 1) + \frac{5}{4}\lambda^2 [3(2u - 1)^2 - 1] \cdot [3(2v - 1)^2 - 1] \quad (5.18)$$

Условная плотность распределения величины v будет представлена выражением

$$f(v/u) = \frac{f(u, v)}{f_1(u)}, \quad (5.19)$$

а условная функция распределения -

$$F(v/u) = \int_0^v f(u, v) dv = \quad (5.20)$$

$$= v + 3\lambda(2u - 1)(v^2 - v) + 5\lambda^2(6u^2 - 6u + 1)(2v^3 - 3v^2 + v)$$

Условная функция распределения для величины u записывается в виде

$$F(u/v) = u + 3r_0(2v - 1)(u^2 - u) + \frac{5}{2}r_0^2 [3(2v - 1)^2 - 1] (2u^3 - 3u^2 + u) \quad (5.21)$$

Условное математическое ожидание равно

$$m(u/v) = \bar{P}_{i+1/i} = \frac{1}{2} + \frac{r_0}{2} (2P_i + 1), \quad (5.22)$$

а условная дисперсия

$$\sigma_{u/v}^2 = \sigma_{i+1/i}^2 = \frac{1 - r_0^2}{12} \quad (5.23)$$

Как следует из (5.23), условная дисперсия не зависит от предшествующего значения обеспеченности P_i , и, следовательно, корреляция гомоскедастична.

Уравнение (5.20) представляет собой линейный совместный закон распределения между равномерно распределенными величинами (например, между обеспеченностями). Их достаточно для того, чтобы моделировать ряд обеспеченностей требуемой длины с заданным значением коэффициента корреляции между ними $|r_0| \leq 0,55$. Для моделирования случайных значений поступаем следующим образом: задавая значение $u = u_1$ и, подставляя в (5.20), получаем условную функцию распределения v для значений $u = u_1$; далее из таблицы случайных чисел $[0, 1]$ берем значение функции распределения $F(v/u)$ и для нахождения случайного значения v_1 решаем кубическое уравнение (5.20); для генерирования случайного временного ряда с заданными свойствами полученное значение v_1 ставится на место u_1 и описанная процедура порождения повторяется еще требуемое число раз. Несмотря на простоту и универсальность метода, имеются два обстоятельства, которые необходимо принять во внимание. Линейная корреляция между обеспеченностями приводит (в данной теоретической схеме) к нелинейной корреляции между самими случайными величинами. Если же первоначально строить линейную корреляцию между исходными случайными величинами, то корреляция между их обеспеченностями будет нелинейной. В этом случае необходимо использовать соответствующую условную функцию распределения и, решая обратную задачу, находить соответствующее условное значение по заданным $F(x/y)$ и r_0 .

Для моделирования случайного процесса с заданным маргинальным законом распределения необходимо указать соотношения между коэффициентом корреляции для обеспеченностей r_0 и коэффициентом корреляции для исходных случайных величин r_r . В частности, для двумерного закона, получаемого путем ограничения в разложении первыми тремя членами и с нормальными априорными плотностями, справедлива формула [212]

$$r_r = \frac{3}{\pi} r_0 \quad (5.24)$$

При групповом анализе материалов наблюдений за стоком, когда истинные числовые параметры распределения вероятностей для каждого отдельного пункта неизвестны, а иногда сам тип распределения недостаточно достоверен, удобнее рассматривать ряды обеспеченностей. Генерирование

искусственных рядов годового стока выполнялось применительно к значениям коэффициента корреляции, изменяющимся от 0 до 0,55 [26,29]. Моделирование рядов стока выполнялось как моделирование последовательностей случайных величин, связанных корреляцией марковского нелинейного типа с маргинальным трехпараметрическим гамма-распределением С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля (модель 5) [189]. При этом предварительно была последовательность из 4000 случайных равномерно распределенных чисел в интервале (0,1), связанных линейной лежандровской корреляцией [150].

5.2. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ГОДОВОГО СТОКА В НАРУШЕННЫХ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ УСЛОВИЯХ

Главная особенность современных стохастических моделей состоит в принятии гипотезы стационарности [187,200,252]. Но если рассматривать геофизические процессы за достаточно длительный исторический период (сотни и тысячи лет), то их следует считать нестационарными. Нарушение однородности и стационарности рядов гидрологических характеристик происходит за счет возрастающего влияния хозяйственной деятельности на водосборах и руслах рек, а также за счет антропогенного изменения современного климата. Это обстоятельство ставит перед современными учеными проблему оценки характеристик стока в условиях антропогенного влияния, решение которой достигается за счет математического моделирования [50,87,96,98,121,188,198,229,276,294,295 и др.] Модели временных рядов, как правило, бывают трех видов: стохастические, детерминированные и детерминированно-стохастические. Для пояснения этого вопроса используем системный подход.

Естественная гидрологическая система может быть представлена в виде одного векторного уравнения [106,107]

$$F_1(Y, \varepsilon, \Lambda, x, t), \quad (5.25)$$

где Y - вектор параметров, характеризующих состояние речного бассейна;

ε - вектор внешних воздействий;

Λ - вектор заданных функций и коэффициентов, характеризующих физические, геометрические, морфологические и т.п. параметры системы;

x - вектор пространственных координат;

t - время.

Обычно (5.25) представляется в дифференциальном виде

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + L(\Lambda, Y) = \varepsilon, \quad (5.26)$$

где L - оператор, представляющий собой составную часть математической модели, отражающий преобразования стока.

Интегрируя (5.26) по времени, получим

$$Y(t) = Y(t_0) - \int L(\Lambda, Y) dt + \int \varepsilon dt, \quad (5.27)$$

где $Y(t_0)$ - начальное состояние системы.

Таким образом, зная начальное состояние системы $Y(t_0)$ и прогнозируя внешние воздействия ε , можно имитировать поведение гидрологической системы, решая тем или иным способом (5.26).

Уравнение (5.27) можно рассматривать как динамическую систему, в которой под внешними воздействиями понимаются стокоформирующие климатические факторы, а под L - операторы моделей, учитывающих динамику гидрологических процессов на водосборе – склоновый сток \rightarrow русловой сток, что нашло свое отражение в работах [87,125,106,107].

Если речь идет о гидрологической системе, находящейся под “прессом” водохозяйственных преобразований, которые управляют движением и распределением воды, то рассматривается природно-техническая система. Антропогенные воздействия при этом могут быть внесены в вектор внешних воздействий ε , если речь идет об изменениях стокоформирующих климатических факторов в результате глобального потепления. Составляющая $Y(t_0)$ в таком случае должна характеризовать исходное состояние гидрологической системы в ненарушенных хозяйственной деятельностью условиях. Изменения параметров водосборов (площадей осушенных болот, площадей водной поверхности искусственных прудов и водохранилищ, площадей орошаемых массивов) включаются в вектор Λ . Тогда L - набор моделей, учитывающих изменения стока в результате водохозяйственных преобразований на водосборах. В некоторых случаях в (5.25) дополнительно должен быть введен вектор управляющих воздействий U , например, при наличии переброски стока из водосбора в водосбор.

Таким образом, задача оценки влияния хозяйственной деятельности на сток сводится к поиску оператора преобразования исходного состояния гидрологической системы (в данном случае это естественный сток) в измененное водохозяйственными преобразованиями. Математическое представление этого оператора может быть разным: функция отклика, интеграл свертки, функция памяти и т.д.

В общем случае уравнение (5.26) носит стохастический характер. Так, величину $Y(t_0)$ можно задать только в вероятностном смысле. Внешние воздействия (осадки, испарение) также являются случайными процессами. Более того, и антропогенные воздействия включают в себя случайную составляющую, так как их интенсивность во многом определяется колебанием климатических факторов. Так, влияние совокупности прудов и водохранилищ, как искусственных объектов ландшафта, определяется не только суммарной площадью водной поверхности, но и дополнительным испарением с этой поверхности, которое, в свою очередь, зависит от водности года.

Рассматривая процесс стока как марковский случайный процесс, согласно которому плотность вероятности зависит только от значения ординаты случайной функции в данный момент времени и не связана с ординатами случайной функции в прошлом, В.В. Коваленко [106] показал, что условная плотность вероятности, также как и безусловная подчиняются дифференциальному уравнению Фокера – Планка – Колмогорова (ФПК)

$$\frac{\partial P(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q} [a(Q,t)P(Q,t)] + 0,5[b(Q,t)P(Q,t)], \quad (5.28)$$

где Q - расход воды;

$P(Q,t)$ - закон распределения, определяемый по данным наблюдений;

$\frac{\partial P(Q,t)}{\partial t}$ - изменение плотности вероятности во времени;

$a(Q,t)$ - скорость изменения математического ожидания случайного процесса в текущий момент времени (коэффициент сноса);

$b(Q,t)$ - скорость изменения дисперсии случайного процесса в текущий момент времени (коэффициент диффузии).

Уравнение (5.28) называют уравнением эволюции плотности распределения и решается оно достаточно сложно при помощи численных методов. При этом коэффициенты сноса и диффузии находятся с использованием того же самого уравнения ФПК, в которое они входят (обратная задача). Если процесс считать установившимся, то искомые параметры можно определить, используя первые четыре статистических момента. В сущности, (5.28) может быть использовано для моделирования нестационарного гидрологического процесса. Однако, если речь идет о математической модели неизученного речного водосбора, на котором нет наблюдений или они имеют незначительную длительность, то параметризация (решение обратной задачи) становится невозможной. Кроме того, если нестационарность обусловлена влиянием хозяйственной деятельности, то расчет и прогноз изменений характеристик стока

затруднен, так как уравнение (5.28) не предусматривает непосредственный учет факторов, характеризующих водохозяйственные преобразования.

Классический подход к решению проблемы оценки характеристик стока в нарушенных водохозяйственными преобразованиями условиях формирования стока состоит в анализе и расчетах стока в естественных условиях и оценке влияния отдельных видов хозяйственной деятельности [37,77,127,128,167,260].

Среди методов учета хозяйственной деятельности на годовой сток рек можно выделить следующие.

1. Метод сравнения характеристик стока в естественном и нарушенном хозяйственной деятельностью состояниях. Недостаток этого подхода состоит в отсутствии данных по стоку рек в естественных условиях его формирования, что особенно актуально для южных областей Украины, где начало наблюдений за стоком практически совпадает с интенсивным хозяйственным освоением территории. Именно в связи с недостатком исходных данных нами и была разработана методика оценки характеристик естественного годового стока на основе метода водно-теплового баланса, предусматривающая использование метеорологических данных. Кроме того, метод сравнения позволяет получить данные об изменении стока только в интегральном виде, без учета динамики водохозяйственных факторов и их индивидуального вклада в изменения стока.

2. Метод водохозяйственного баланса основан на учете непосредственных сбросов и водозаборов на водосборах

$$W_B = W_E - \Delta W_{II} + \Delta W_{CB}, \quad (5.29)$$

где W_B, W_E - объемы бытового и естественного стока;

ΔW_{II} - безвозвратные изъятия стока из поверхностных водотоков (потери);

ΔW_{CB} - сброс воды в поверхностные водотоки.

Преимущества этого подхода состоят в возможности оценить влияние каждого водохозяйственного фактора в отдельности. Но решение проблемы опять же связано с задачами приведения стока к естественному виду. Кроме того, детальные экспериментальные данные и надежные материалы учета водопотребления и водоотведения отсутствуют, что приводит к различного вида обобщениям и ставит под сомнение качество полученных оценок.

Наиболее перспективными в оценке влияния водохозяйственных преобразований на сток являются методы имитационного физического и математического моделирования.

3. Методы физического моделирования чаще всего применяются для исследования участков русел, при этом выявляются возможные изменения режима реки. Физическое моделирование целых водосборов используется очень редко и, по сути, является уникальным.

4. В основе применения методов математического моделирования чаще всего лежит детерминистический подход. В начале происходит изучение процесса и составление детерминистических уравнений, описывающих во времени и пространстве изменения стока под влиянием хозяйственной деятельности, а затем выполняется численный эксперимент: по разработанной схеме при разных начальных условиях и при различных параметрах хозяйственной деятельности проигрываются различные ситуации на водосборе. Методы математического моделирования позволяют количественно оценить влияние самого разнообразного сочетания естественных и антропогенных факторов, и тем самым дают возможность рассчитать и спрогнозировать водный режим в будущем.

Использование стохастического подхода при расчетах и прогнозировании стока приведено в работах В.А. Лобанова [131,132]. Предложенный им метод “срезки” построен на самых общих свойствах природных процессов: композиционности их структуры, сформированной по принципу суперпозиции и циклического характера колебаний стока. В качестве однородных условий в методе принимаются минимумы тех пульсаций, амплитуда которых превышает амплитуду погрешности. Эти минимумы характеризуют отсутствие процесса наименьшего масштаба и по линии их соединяющей осуществляется “срезка”, т.е. отделение процесса наименьшего масштаба от всех остальных. С помощью метода срезки осуществляется последовательное разделение процессов, начиная от наименьшего масштаба и заканчивая наибольшим. При этом возможен и обратный процесс восстановления стока, подобно тому, как это было сделано нами на основе метода главных компонент [142]. Второй метод декомпозиции исходных рядов осуществлен на основе связей среднемесячных расходов воды каждого года со среднемноголетним гидрографом. Идентификация составляющих, обусловленных хозяйственной деятельностью на водосборах и руслах рек, проводилось с использованием имеющихся данных о влиянии хозяйственной деятельности для крупных регионов (промышленный район Горного Урала, бассейн Арала и т.д.), где тот или иной вид антропогенного воздействия (водозабор на промышленные нужды или, например, влияние орошения) превалируют. Методика расчетов значений гидрологической характеристики может быть представлена уравнением

$$Y_{P_t} = f(P_t(Y_{ECT})) + Y_{АНТР./t=P_t}, \quad (5.30)$$

где Y_{P_t} - расчетное значение гидрологической характеристики проектной обеспеченности P_t ;

$f(P_t(Y_{ECT}))$ - расчетное значение гидрологической характеристики в естественных условиях;

$Y_{АНТР./t=P_t}$ - значение составляющей стока, обусловленное влиянием хозяйственной деятельности на период времени в будущем, соответствующий P_t - ой расчетной обеспеченности.

При решении уравнения (5.30) решение проблемы восстановления характеристик естественного стока при отсутствии данных наблюдений было выполнено В.А. Лобановым на основе представления годового стока в виде суммы сезонных составляющих. При этом каждая сезонная составляющая определялась на основе связей с комплексом факторов этого сезона, основными среди которых являются климатические.

Оператором преобразования L исходного состояния гидрологической системы в уравнении (5.26), описывающим ее изменение при водохозяйственных воздействиях, может служить модель нейросети. В качестве научного предмета искусственные нейронные сети впервые заявили о себе в 40-е годы. Стремясь воспроизвести функции человеческого мозга, исследователи создали простые аппаратные, а позже - программные, модели биологического нейрона и системы его соединений. Первое систематическое изучение искусственных нейронных сетей было предпринято Маккаллоком и Питтсом в 1943 году. Позднее они исследовали сетевые парадигмы для распознавания изображений, подвергаемых сдвигам и поворотам. Простая нейронная модель использовалась в большей части их работы [155]. Элемент Σ умножает каждый вход x на вес w и суммирует взвешенные входы. Если эта сумма больше заданного порогового значения, выход равен единице, в противном случае – нулю. Эти системы (и множество им подобных) получили название персептронов. Розенблатт доказал теорему об обучении персептронов [202], но свое полноценное развитие нейросети получили после того как был предложен эффективный алгоритм обучения многослойных персептронов [273], основанный на вычислении градиента функции ошибки. Примененный для обучения нейросети метод обратного распространения ошибки фактически представляет собой обобщение метода наименьших квадратов применительно к многослойным нейросетям [287]. Способность к обучению дала возможность применения данного алгоритма для решения таких задач, как распознавание образов, классификация, прогнозирование. В частности, используя данные о водопотреблении, можно выполнить обучение нейросети, и моделировать бытовой сток в зависимости от заданного уровня хозяйственной

деятельности [290]. Однако, для успешного решения этой задачи необходимо создать эталоны распознаваемых образов, что представляет собой чрезвычайно трудоемкий процесс, требующий достаточно полной информации о величинах водопотребления на водосборе. Основная цель функционирования нейросистемы как системы искусственного интеллекта заключается, во-первых, в возможности ее обучения для воспроизведения динамики того или иного процесса. Во-вторых, и это главное, нейросетевой алгоритм должен решать задачи прогноза и воспроизведения дальнейшей временной эволюции процесса или системы на основе выполненного обучения. В этой связи перспективы применения нейросетевого подхода в задачах изучения географических и гидрологических систем представляются многообещающими.

Тем не менее, нейросетевая модель не отвечает полностью поставленным задачам моделирования бытового стока, поскольку в водохозяйственном балансе присутствуют как неслучайные величины, обусловленные деятельностью человека, так и случайные, связанные с колебаниями климата. Решение проблемы оценки характеристик годового стока в условиях водохозяйственных преобразований на водосборах может быть достигнуто путем стохастического моделирования, при котором обучение сети заменяется имитационным экспериментом, позволяющим моделировать различные ситуации, связанные как изменениями климата, так и хозяйственной деятельности.

5.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТЫ ГОДОВОГО СТОКА ПРИ НАЛИЧИИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ НА ВОДОСБОРАХ РЕК ЗОНЫ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ

Разработанная нами математическая модель годового стока в условиях водохозяйственных преобразований на водосборах сочетает в себе стохастический и детерминистический подходы к расчетам годового стока, т.е. относится к числу детерминированно-стохастических моделей [60,62,63,66,140,150,151]. В её основе лежит уравнение водохозяйственного баланса водосбора (5.29), которое для большинства водосборов зоны недостаточного увлажнения в пределах Украины можно более подробно представить следующим образом:

$$W_B = W_E - \Delta W_{OP} - \Delta W_{ИСП} + \Delta W_{СБ}, \quad (5.31)$$

где W_B, W_E - объемы бытового и естественного стока;

ΔW_{OP} - объем безвозвратных потерь стока на орошение;

$\Delta W_{ИСП}$ - объем потерь стока на дополнительное испарение с водной поверхности прудов и водохранилищ;

$\Delta W_{СБ}$ - объем дополнительного сброса воды в поверхностные водотоки.

На первом этапе создания моделей рассматривался вопрос об оценке отдельных составляющих ($\Delta W_{OP}, \Delta W_{ИСП}, \Delta W_{СБ}$) водохозяйственных балансов, которые содержат в себе информацию о характере хозяйственной деятельности в пределах водосборов. В дальнейшем осуществлялся переход к вероятностной форме записи уравнения (5.31), на основе которой выполнялось наложение антропогенных факторов на колебания естественного стока.

Существенным отличием данной модели от детерминированно-стохастической модели, предложенной В.А.Лобановым (5.30), является выделение в каждой антропогенной составляющей ($\Delta W_{OP}, \Delta W_{ИСП}, \Delta W_{СБ}$) показателей, обусловленных как влиянием колебаний климата, так и директивных, относящихся к числу управляемых человеком, например, площади орошаемых земель, площади водной поверхности искусственных водоемов, характеристики оросительных систем и т.п..

Стохастическое моделирование рядов бытового стока выполнялось отдельно для каждого из исследуемых факторов антропогенного влияния на основе уравнений водохозяйственных балансов, учитывающих реальную физическую картину взаимодействия того или иного фактора хозяйственной деятельности с годовым стоком:

а) при изъятии воды для целей орошения [59,60,66,285]

$$Y_{B,P} = Y_{E,P} - \frac{M_{0,100-P}}{\eta} f_{OP}; \quad (5.32)$$

б) при наличии на водосборе искусственных водоемов с сезонным регулированием стока, когда потери обусловлены затратами на дополнительное испарение с водной поверхности [59,62,63]

$$Y_{B,P} = Y_{E,P}(1 - f_B) - (E_B - X)f_B \quad (5.33)$$

или

$$Y_{B,P} = Y_{E,P}(1 - \alpha_P f_B), \quad \text{где} \quad \alpha_P = \varphi(Y_P); \quad (5.34)$$

в) при наличии возвратных (сбросных) вод с орошаемых массивов [140,275]

$$Y_{B,P} = Y_{E,P} + \xi \frac{M_{0,100-P}}{\eta} (1 - \eta) f_{OP}, \quad (5.35)$$

где $Y_{B,P}, Y_{E,P}$ - естественный и бытовой сток с заданной обеспеченностью P , выраженный мм; f_{OP}, f_B - суммарная площадь орошаемых массивов и водной поверхности искусственных водоемов, выраженные в долях от общей площади водосбора F ; η - коэффициент полезного действия оросительной системы; ξ - коэффициент возвратных вод, образовавшихся за счет потерь стока при его переброске по каналам оросительной сети; X - осадки, выпадающие на суммарную водную поверхность прудов и водохранилищ; E_B - суммарное испарение с водной поверхности прудов и водохранилищ, определение которого выполнялось по методикам [93,94,262]; $M_{0,100-P}$ - оросительная норма-нетто с вероятностью превышения $100 - P$; α_P - безразмерный коэффициент, который позволяет учесть изменение $(E_B - X)$ в зависимости от величины годового стока обеспеченностью P .

Моделирование рядов естественного годового стока выполнялось как моделирование последовательностей случайных величин, связанных корреляцией марковского нелинейного типа с маргинальным трехпараметрическим гамма-распределением С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля (модель 5) [189] на основе методики, приведенной в подразделе 5.1.

Стохастическое моделирование предполагает наличие входных данных о статистических параметрах годового стока в естественных условиях его формирования. Для определения средних многолетних значений естественного годового стока использовались изложенные в разделах 1 и 2 методы оценки норм естественного годового стока на основе климатического стока \bar{Y}_K с последующим определением коэффициентов перехода от норм климатического годового стока к естественному.

Для определения параметров естественного годового стока, определяемых по наблюдаемым данным с малой степенью достоверности, - коэффициентов автокорреляции в рядах годового стока $r(1)$, отношения Cs/Cv - рекомендуется использовать результаты их статистического районирования, представленные в разделе 4.

5.3.1. Представление детерминированно-стохастических моделей как частного случая уравнения эволюции гидрологической системы. Уравнения водохозяйственного баланса вида (5.32–5.35), лежащие в основе созданных нами детерминированно-стохастических моделей, можно описать через системный подход, изложенный в п.5.2. Обращаясь к (5.27), начальное состояние гидрологической системы $Y(t_0)$ представляется как ее состояние в естественных условиях формирования стока, т.е. в виде характеристики годового стока $Y_{E,P}$, тогда L - антропогенная составляющая уравнения водохозяйственного баланса, которая отражает динамику процесса преобразования естественного стока в бытовой. Внешние воздействия ε подразумевают климатические стокоформирующие факторы, которые на данном этапе исследования принимаются неизменными, т.е. $\varepsilon = 0$. Уравнения водохозяйственного баланса можно описать, используя класс случайных процессов “белого шума” или процессов с независимыми ординатами, в котором применяется понятие дельта - функции $\delta(\tau)$. Процесс с независимыми ординатами определяется как процесс, который можно представить как следующие друг за другом импульсы

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau) d\tau = 1 \text{ при } \tau = 0, \quad (5.36)$$

$$\delta(\tau) = 0 \text{ при } \tau \neq 0 \quad (5.37)$$

или

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau - a) d\tau = 1 \text{ при } \tau = a, \quad (5.38)$$

$$\delta(\tau - a) = 0 \text{ при } \tau \neq a \quad (5.39)$$

В этом случае уравнение гидрологической системы (5.27), описывающее водохозяйственные преобразования в виде потерь стока на испарение с поверхности прудов и водохранилищ, как искусственного объекта ландшафта (5.33), с применением дельта-функции примет вид

$$\Delta Y = Y(t_0) - Y(t) = Y_E - Y_B = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - h) Y_E dh = 0, \quad (5.40)$$

Интеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - h) Y_E dh = L \quad (5.41)$$

можно рассматривать как функцию отклика естественной гидрологической системы $Y(t_0)$ на внешнее антропогенное воздействие Δ . Будучи представленной в виде

$$L = \int_{-\infty}^{\infty} f_B \delta(t-h) Y_E dh + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E_B - X}{Y_E} f_B \delta(t-h) Y_E dh, \quad (5.42)$$

функция отклика L при $Y_E = const$ с использованием свойств дельта-функции (5.36-5.39) позволит нам прийти к выражению, вытекающему из уравнения водохозяйственного баланса (5.33)

$$\Delta Y = Y_E f_B + (E_B - X) f_B \quad (5.43)$$

Но поскольку $Y_E \neq const$, а принимает значения, соответствующие различной обеспеченности, реализации функции отклика, как будет показано ниже, представляют собой набор функций вида $\bar{Y}_B = \varphi(f_B)$, $C_{vB} = \varphi(f_B)$ и $C_{sB} = \varphi(f_B)$, отражающих изменения кривых распределения бытового стока при наличии на водосборе водохозяйственных мероприятий.

Уравнения (5.32-5.35) учитывают взаимосвязи между вероятностными характеристиками стока (как естественного, так и бытового) и вероятностными характеристиками антропогенных показателей, имеющих стохастическую природу. В них достигнут определенный компромисс между достаточной физической обоснованностью модели и компактностью обеспечения ее параметрами, которые можно определить на основе данных стандартных наблюдений сети гидрометеорологических станций. Таким образом, при создании детерминированно-стохастических моделей бытового стока помимо решения задачи построения стохастической модели естественного годового стока возникает проблема стохастического описания таких элементов водохозяйственных балансов, как потери стока на дополнительное испарение с водной поверхности прудов и водохранилищ, дефицит водопотребления и т.д.

5.3.2. Обоснование стохастической модели, описывающей влияние искусственных водоемов на годовой сток. Такой вид водохозяйственных преобразований в пределах водосборов как создание искусственных водоемов с целью многолетнего и преимущественно сезонного регулирования стока получил интенсивное развитие в конце 50-х - начале 60-х годов. Для северо-западного Причерноморья было характерным создание так называемых “копаней”, расположенных в 50-200 м от русла, в

которые вода закачивалась насосом. Впоследствии выяснилось, что эффективность такого рода сооружений невысока. Равнинная местность с легкосмываемыми грунтами, примитивные водосбросные сооружения привели, в конечном счете, к заилению водоемов и, следовательно, к ухудшению качества воды. В условиях засушливого климата, с высокими теплоэнергетическими ресурсами, такие водоемы начинают играть роль испарителей, существенно снижающих сток рек. Влияние прудов и водохранилищ как искусственных объектов ландшафта может быть учтено следующим балансовым соотношением [60,263,264]

$$Y_B F = Y_E (F - \sum F_B) - (E_B - X) \sum F_B, \quad (5.44)$$

где Y_B, Y_E - естественный и бытовой сток, мм;

E_B - испарение с водной поверхности, мм;

X - суммарные осадки, мм;

$\sum F_B$ - суммарная площадь водной поверхности искусственных водоемов при НПУ в пределах водосбора.

Потери стока в результате дополнительного испарения с водной поверхности определяются разностью $(E_B - X)$, которая подчиняется зональному (широтному) закону распределения и связана с водностью года, а также суммарной площадью водной поверхности $\sum F_B$. Определение суммарной площади затопления $\sum F_B$ выполнено с использованием постулатов инвариантности в морфологии водоемов засушливой зоны [165]. Рассматривая пруды и водохранилища как генетически однородную группу водоемов, авторы определяли основные морфологические характеристики не для одного, а для нескольких водоемов, расположенных в пределах водосбора. Непосредственно для моделирования использовались полученные из (5.44) выражение вида (5.33) или (5.34), где α_P - безразмерный коэффициент, представленный в виде функции водности года

$$\alpha_P = \frac{602}{\bar{Y}_{E,P}^{1,14}} \quad (5.45)$$

В уравнении (5.34) выполнена дифференциация (разделение) неслучайной (директивно задаваемой) компоненты f_B и "климатической" компоненты $\alpha_P = \phi(Y_P)$, подчиняющейся стохастическим законам распределения. По сути, зависимость (5.34) и (5.35) описывают реальную физическую связь между потерями годового стока на дополнительное испарение с водной

поверхности и водностью года, задаваемой нормой естественного годового стока требуемой обеспеченности P : чем выше водность года, тем меньше потери на дополнительное испарение с водной поверхности искусственных водоемов. Предложенный прием позволяет выполнять численные эксперименты в моделировании, при которых значение f_B в каждом испытании задается постоянным, что позволяет сохранить стационарность генерируемого ряда бытового стока. Поскольку значительные потери на дополнительное испарение с поверхности искусственных водоемов наблюдаются в зоне недостаточного увлажнения, при генерировании рядов естественного стока использовались нормы климатического стока, заданные в диапазоне от 50 до 10мм, характерные для южных регионов Украины. Результатом такого рода экспериментов являются зависимости оценок статистических параметров бытового стока от неслучайного показателя f_B , которые для среднемноголетних величин годового стока могут быть описаны следующей зависимостью

$$\bar{Y}_B = \bar{Y}_K e^{-\alpha f_B}, \quad (5.46)$$

где α - коэффициент, характеризующий интенсивность снижения нормы естественного стока с ростом относительной площади водной поверхности f_B .

Величина коэффициента α , в свою очередь, определяется соотношением ресурсов тепла и влаги $\beta_H = \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m}$

$$\alpha = -0.622(1 - \beta_H), \quad \text{при } \beta_H \geq 0,45 \quad (5.47)$$

Влияние искусственных водоемов, не обладающих значительной регулирующей емкостью, в зоне недостаточного увлажнения оборачивается для водных ресурсов не только снижением нормы годового стока, но и увеличением его многолетней изменчивости и асимметричности распределения. Зависимость коэффициентов вариации и асимметрии бытового стока от относительной площади водной поверхности искусственных водоемов можно представить в виде регрессионных зависимостей

$$C_{VB} = 1,50 - 0,0275\bar{Y}_K + 0,0576f_B; R = 0,902, \quad (5.48)$$

$$C_{SB} = 1,80 - 0,0325\bar{Y}_K + 0,1643f_B; R = 0,870, \quad (5.49)$$

где C_{VB}, C_{SB} - коэффициенты изменчивости и асимметрии годового стока при наличии на водосборе искусственных водоемов;

\bar{Y}_K - норма климатического стока, мм; f_B - относительная площадь водной поверхности при НПУ,%; R - коэффициент линейной множественной регрессии.

При этом первое слагаемое в (5.48) равно предельному максимальному значению коэффициента вариации естественного годового стока $Cv, \max = 1,5$, соответствующее минимальному значению климатического стока на юге Украины - $\bar{Y}_K = 10 \text{ мм}$.

Усиление неравномерности многолетнего распределения стока обозначает в первую очередь снижение стока маловодных лет, которые и в естественных условиях являются лимитирующими для сельского хозяйства. Таким образом, интенсивность изменений стока становится более выраженной при усилении засушливости климата, интегральной характеристикой которой может быть норма климатического стока.

5.3.3. Обоснование стохастической модели, описывающей влияние оросительных мелиораций на годовой сток. Уравнение водохозяйственного баланса при изъятии вод из поверхностных водотоков для целей орошения в варианте пригодном для стохастического моделирования представлено выражением (5.32). Его составной частью является оросительная норма-нетто, для оценки которой использовался подход, основанный на методе совместного решения уравнений водного и теплового балансов [159,160]. Приращение суммарного испарения, выраженного в отношении к E_m ($\beta_E = \frac{E}{E_m}$), аппроксимируется [159,160]

и как функция F относительного недостатка насыщения воздуха (см. формулу 1.25), и как функция влажности почвы, выраженная в долях от наименьшей влагоемкости

$$d\beta_E = rv^{r-1}(1-\beta_E^n)^{\frac{n+1}{n}} dv, \quad (5.50)$$

где r - параметр, зависящий от водно-физических свойств почвы;
 v - влажность почвы, выраженная в долях от наименьшей влагоемкости w_{HB} .

Решение уравнения (5.50) должно удовлетворять следующим условиям

$$\begin{aligned} \beta_E &\rightarrow 0 \text{ при } v \rightarrow 0, \\ \beta_E &\rightarrow 1 \text{ при } v \rightarrow \infty, \\ \beta_E &\rightarrow \beta_{E_{HB}} \text{ при } v \rightarrow w_{HB} = 1 \end{aligned} \quad (5.51)$$

После разделения переменных

$$rv^{r-1}dv = \frac{d\beta_E}{(1 - \beta_E^n)^{\frac{n+1}{n}}} \quad (5.52)$$

и интегрирования левой части от 0 до v , а правой от 0 до β_E , В.С.Мезенцевым получено следующее балансовое соотношение

$$\beta_E = (1 + v^{-rn})^{-\frac{1}{n}} \quad (5.53)$$

С учетом обозначений (1.14) выражение (5.53) принимает вид

$$E = E_m (1 + v^{-rn})^{-\frac{1}{n}} \quad (5.54)$$

Сопоставление (1.27) и (5.54) приводит к связующему выражению

$$v^r = \frac{X + w_{HB}(v_1 - v_2)}{E_m} = \frac{H}{E_m}, \quad (5.55)$$

где v - средняя за расчетный период влажность почвы, выраженная в долях от наименьшей влагоемкости w_{HB} ; r - параметр, зависящий от водно-физических свойств почвы, для легких почв - $r = 1,1 \div 1,5$; для средних почв - $r = 1,5 \div 2,0$; для тяжелых почв - $r = 2,0 \div 3,0$; X - средние за расчетный период осадки, мм; w_{HB} - наименьшая влагоемкость почвы, мм; v_1 - относительная влажность почвы на начало расчетного периода; v_2 - относительная влажность почвы на конец расчетного периода; E_m - максимально возможное испарение за расчетный период, мм; H - суммарная характеристика увлажнения, мм.

При исследовании влияния гидромелиораций на сток вводится понятие гидромелиоративной нормы. Гидромелиоративная норма – это недостаток или избыток ресурсов увлажнения по сравнению с некоторым количеством влаги, необходимым в вегетационный период для развития той или иной сельскохозяйственной культуры.

Как уже отмечалось, ресурсы увлажнения определяются выпадающими за расчетный период осадками и изменением запасов влаги в деятельном слое почвы за расчетный период

$$H = X + w_1 - w_2, \quad (5.56)$$

где H - характеристика ресурсов увлажнения (мм);

X - атмосферные осадки, выпадающие на мелиорируемый участок за расчетный период(мм);

w_1, w_2 - влагозапасы в почве на начало и конец расчетного периода.

При близком залегании грунтовых вод, участвующих в водном балансе корнеобитаемого слоя, вместо (5.56) используется выражение (2.12).

Для оптимального развития растений необходима некоторая оптимальная влажность почвы w_0 , которая может быть представлена в виде безразмерной характеристики v_0

$$v_0 = \frac{w_0}{w_{HB}}, \quad (5.57)$$

где v_0 - безразмерная характеристика среднего за весь межполивной период уровня увлажнения почвы, при котором развитие преобладающих на участке сельскохозяйственных культур происходит наиболее оптимально;

w_0 - величина оптимального запаса влаги в расчетном слое почвы;

w_{HB} - наименьшая влагоемкость почвы этого же слоя.

Различным культурам соответствует различный оптимум увлажнения почвы. Для таких влаголюбивых культур как рис, v_0 обычно принимается равным $1,0 \div 1,2$, для засухоустойчивых зерновых культур - $v_0 = 0.8$ и т.п.

Величине оптимальной влажности почвы v_0 соответствуют оптимальные ресурсы увлажнения H_0 , которые в соответствии с (5.55) связаны с оптимальной влажностью почвы соотношением

$$v_0^r = \frac{H_0}{E_m} \quad (5.58)$$

Разность между фактическим H и оптимальным H_0 увлажнением составляет ΔH

$$\Delta H = H - H_0 = X + w_1 - w_2 - v_0^r E_m, \quad (5.59)$$

где величина ΔH - недостаток или избыток потребления воды растениями в естественных условиях.

При близком залегании грунтовых вод в уравнение (5.59) вводится дополнительная величина g , характеризующая приток грунтовых вод в корнеобитаемый слой

$$\Delta H = H - H_0 = X + w_1 - w_2 + g - v_0^r E_m \quad (5.60)$$

Выражения (5.59) и (5.60) соответствуют естественным (вне режима осушения или орошения) условиям.

В условиях оросительных мелиораций (при глубоком залегании подземных вод) водный баланс орошаемого участка в общем виде описывается уравнением

$$X + w_1' - w_2' + m = E' + Y' , \quad (5.61)$$

где X - атмосферные осадки, выпадающие на орошаемый участок; w_1', w_2' - влагозапасы в почве на начало и конец межполивного периода; m - количество воды, подаваемое на орошаемый участок; E' - суммарное испарение с поверхности орошаемого участка; Y' - сток с орошаемого участка.

В практике оросительных мелиораций применяется дискретная форма полива, причем поливы назначаются, когда влажность почвы достигает некоторого минимума, например, влажности разрыва капиллярных связей. В этом случае влажность почвы на начало и конец межполивного периода будет равна этому минимуму, т.е.

$$w_1' = w_2' \quad (5.62)$$

При выполнении условия (5.62) выражение (5.61) преобразуется к виду

$$X + m_0 = E' + Y' , \quad (5.63)$$

где m_0 - количество воды, подаваемое на орошаемый участок, которое должно обеспечить требуемый оптимум увлажнения, и называемое поливной нормой.

Уравнение (1.27) для расчета испарения с орошаемого участка может быть записано в виде

$$E_{0П} = E_m \left[1 + \left(\frac{X + m_0}{E_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (5.64)$$

где $E_{0П}$ - оптимальное испарение с поверхности суши, т.е. испарение, которое имеет место при условиях наиболее благоприятного (оптимального) увлажнения сельскохозяйственных посевов за счет оросительных поливов.

С другой стороны, испарение можно рассматривать как функцию влажности почвы, т.е. в виде (5.54). Поскольку в данном случае $v = v_0$, выражение для оптимального испарения примет вид

$$E_{0П} = E_m (1 + v_0^{-m})^{-\frac{1}{n}} , \quad (5.65)$$

Приравнивая правые части выражений (6.64) и (6.65) определяют необходимое количество поливной воды m_0

$$m_0 = v_0^r E_m - X \quad (5.66)$$

Оросительная норма-нетто рассчитывается как сумма поливных норм за весь период вегетации в расчете на среднеструктурный гектар орошаемых в пределах водосбора земель

$$M_0 = \sum m_{0i} \quad (5.67)$$

При выполнении условия (5.62) дефицит водопотребления ΔH равен поливной (гидромелиоративной) норме m_0 .

Преимуществом избранного нами расчетного метода оценки оросительных норм состоит в том, что он позволяет дать четкое (однозначное) определение оптимального испарения с поверхности орошаемого участка, в то время как в других методиках, например, в методике ГГИ [246,247], для его определения используется понятие “испаряемости” E_0 , рассчитываемой по методам М.И.Будыко и Л.И. Зубенок [35] или А.Р.Константинова [112,113], недостатки которых уже рассматривались в разделе 1. В модели суммарного испарения А.И. Будаговского [31], содержащей величины E_T (транспирация сомкнутым растительным покровом) и E_{II} (испарение почвой, поверхность которой полностью смочена), при практическом применении [73,74] опять же используется приближенный способ расчета этих характеристик по методике Л.И. Зубенок, т.е. с привлечением понятия испаряемости. Для решения задач моделирования стока в условиях орошения для территории Украины вполне приемлемым является также метод А.М. Алпатьева [1], в котором путем сопоставления суммы оросительной воды и осадков с испарением за вегетационный период получено устойчивое соотношение между

$$E = \beta \sum d, \quad (5.68)$$

где E - суммарное испарение; β - коэффициент испарения, определяемый для различных сельскохозяйственных культур в зависимости от суммы температур воздуха; $\sum d$ - сумма среднесуточных значений дефицита влажности воздуха за вегетационный период культуры.

Недостатком этого метода является неучет оптимального увлажнения почвы для разных по механическому составу почв.

Статистическая обработка рассчитанных значений оросительных норм, выполненная по метеорологическим станциям юга Украины [60] при различных нормах оптимального увлажнения почвы, позволила установить, что коэффициенты внутрирядной корреляции невелики и их порядок соответствует относительной ошибке их определения. Коэффициент вариации оросительных норм Cv_{M_0} может быть оценен по полученной эмпирической формуле вида [191]

$$Cv_{M_0} = \frac{100v_0}{M_0} \quad (5.69)$$

В свою очередь, коэффициенты асимметрии оросительных норм близки к нулю. В связи с этим стохастическое генерирование рядов оросительных норм проводилось как генерирование ряда независимых случайных величин, удовлетворяющих функции безусловного распределения. Как правило, эмпирические функции распределения оросительных норм аппроксимируются двухпараметрическими функциями, например, логнормального или гамма-распределения.

Так же, как и при оценке влияния искусственных водоемов, антропогенную составляющую ΔW_{OP} уравнения (5.32) можно разделить на климатическую M_0 и антропогенную компоненты f_{OP}, η . Базисная часть уравнения (5.32) выражается в виде оросительных норм сельскохозяйственных культур M_0 . Закономерности многолетних колебаний последних удовлетворяют требованию стохастической стационарности процесса, а значит, к ним применимы те же математические схемы, что и при статистическом описании речного стока.

Чтобы учесть при моделировании рядов бытового стока соответствие стока и оросительных норм по обеспеченности без больших потерь в точности расчета, можно использовать группировки маловодных (обеспеченность стока $P > 75\%$), многоводных ($P < 25\%$) и средних по водности ($25 \leq P \leq 75\%$) лет. Так, в соответствие величинам годового стока, попадающим в группу маловодных лет ($P > 75\%$), ставились оросительные нормы M_0 , осредненные в интервале обеспеченностей $P < 25\%$. И наоборот, значения годового стока малой обеспеченности ($P < 25\%$) комбинировались со средними значениями дефицитов водопотребления, имеющих вероятность превышения $P > 75\%$. Такой подход оправдывается реальными физическими процессами, происходящими на водосборе: в засушливые годы возрастает дефицит водопотребления сельскохозяйственных культур, а значения годового стока уменьшаются; в

многоводные годы необходимость в больших затратах воды на орошение отпадает.

Характер построенных по смоделированным рядам кривых $\bar{Y}_{op} = \varphi(f_{op})$, $C_{v\,op} = \varphi(f_{op})$ и $C_{s\,op} = \varphi(f_{op})$ для территории юга Украины и Молдавии аналогичен тем, которые были получены при оценке влияния искусственных водоемов на параметры годового стока. С ростом величин f_B и f_{op} происходит уменьшение нормы \bar{Y} и увеличение коэффициентов C_v и C_s [60]. Причем эффект влияния хозяйственной деятельности во многом определяется увлажненностью территории. По мере перехода в более засушливые районы естественные водные ресурсы уменьшаются и их реакция на один и тот же уровень антропогенного воздействия становится более выраженной. Интенсивность изменения параметров годового стока по мере перехода в засушливые регионы усиливается.

На рис. 5.1 приводятся зависимости \bar{Y}_B , C_{vB} , C_{sB} (индекс «б» у параметров соответствует условиям зарегулированности стока прудами или водохранилищами или наличию оросительных мелиораций) от относительных площадей f_B и f_{op} (для трех уровней оптимального увлажнения $v_0 = 0,8; 0,9; 1,0$) при исходной норме естественного стока $\bar{Y}_E = 20$ мм. Чем больше оптимальное увлажнение почвы, необходимое для произростания сельскохозяйственных культур, тем большее количество воды должно быть изъято из местного стока для целей орошения, что и вызывает усиление интенсивности снижения стока.

Хозяйственная деятельность в виде заборов воды на орошение

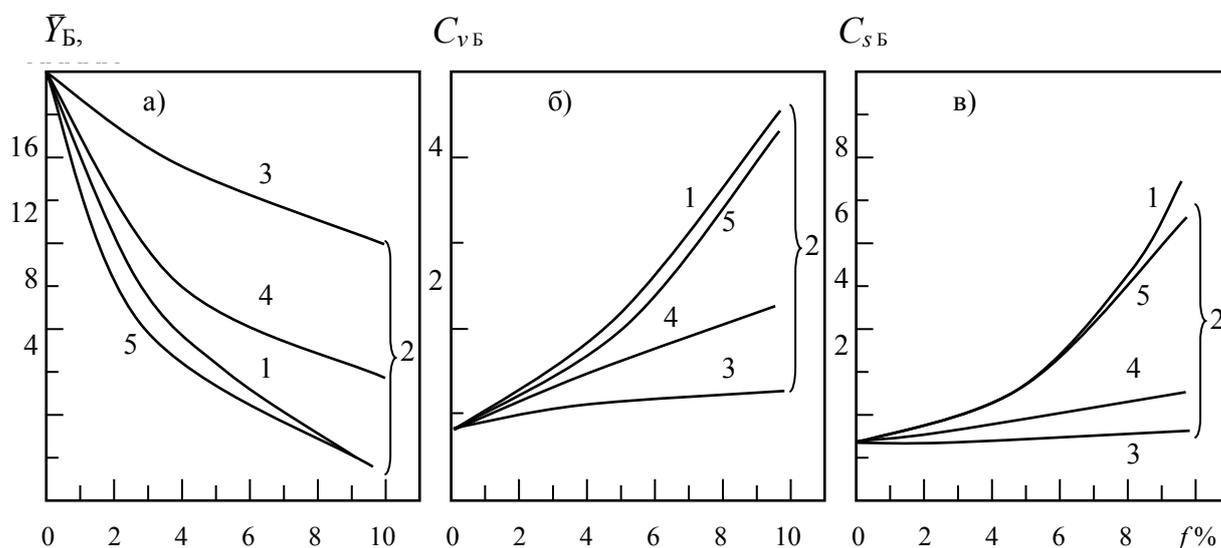


Рис.5.1 Зависимости среднего многолетнего слоя стока (а), коэффициентов вариации (б) и асимметрии (в) рядов бытового стока от степени зарегулированности водосбора прудами и водохранилищами (1) и площадей орошаемого земледелия (2) при различных уровнях v_0 оптимального увлажнения. 3) $v_0 = 0,8$; 4) $v_0 = 0,9$; $v_0 = 1,0$.

вызывает не только увеличение многолетней изменчивости и рост асимметрии в рядах годового стока, но и приводит к нарушению связей между стоком предыдущих и последующих лет, характеризуемых коэффициентом $r(1)$. На основе численных экспериментов было установлено [133], что под влиянием потерь на дополнительное испарение с водной поверхности и заборов воды на орошение из местного стока происходит разрушение внутренней структуры рядов.

Коэффициент автокорреляции $r(1) = r_{i,i+1}$ уменьшается по мере роста орошаемых площадей или площадей водной поверхности искусственных водоемов (рис.5.2). Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе автокорреляционных функций рядов годового стока, так как обычно принимается во внимание только регулирующее воздействие крупных водохранилищ, приводящее не к уменьшению, а к увеличению коэффициентов автокорреляции.

Процесс орошения, как правило, сопровождается появлением возвратных вод. Возвратные воды W_{B3} возникают за счет фильтрационных потерь из водопроводящей и водораспределительной сети

$$W_{B3} = F_{OP} \xi (1 - \eta) \frac{M_0}{\eta} \quad (5.70)$$

и в уравнениях водохозяйственного баланса, используемых при моделировании, учитываются в виде (5.35).

Коэффициент ξ задает долю поступления неиспользованных при орошении вод в поверхностные водотоки. Его значение определяется положением орошаемых массивов относительно водоприемника (пойменные, террасные, приводораздельные), а также наличием или отсутствием гидрографической связи зоны орошения с рассматриваемой рекой [127]. Для малах рек, недренирующих водоносные горизонты, $\xi = 0$ и в процессе моделирования учитывается только водозабор.

Результаты численных экспериментов позволили установить, что наличие возвратных вод способствует увеличению норм годового стока, уменьшает изменчивость годового стока в многолетнем разрезе. Коэффициент асимметрии при этом изменяется незначительно.

5.3.4. Оценка характеристик годового стока в условиях хозяйственной деятельности для рек зоны недостаточного увлажнения на основе результатов стохастического моделирования. Поскольку в пределах одной и той же реки количественный и качественный состав антропогенных факторов может меняться, для возможности учета их совместного действия предложено использовать не сами статистические

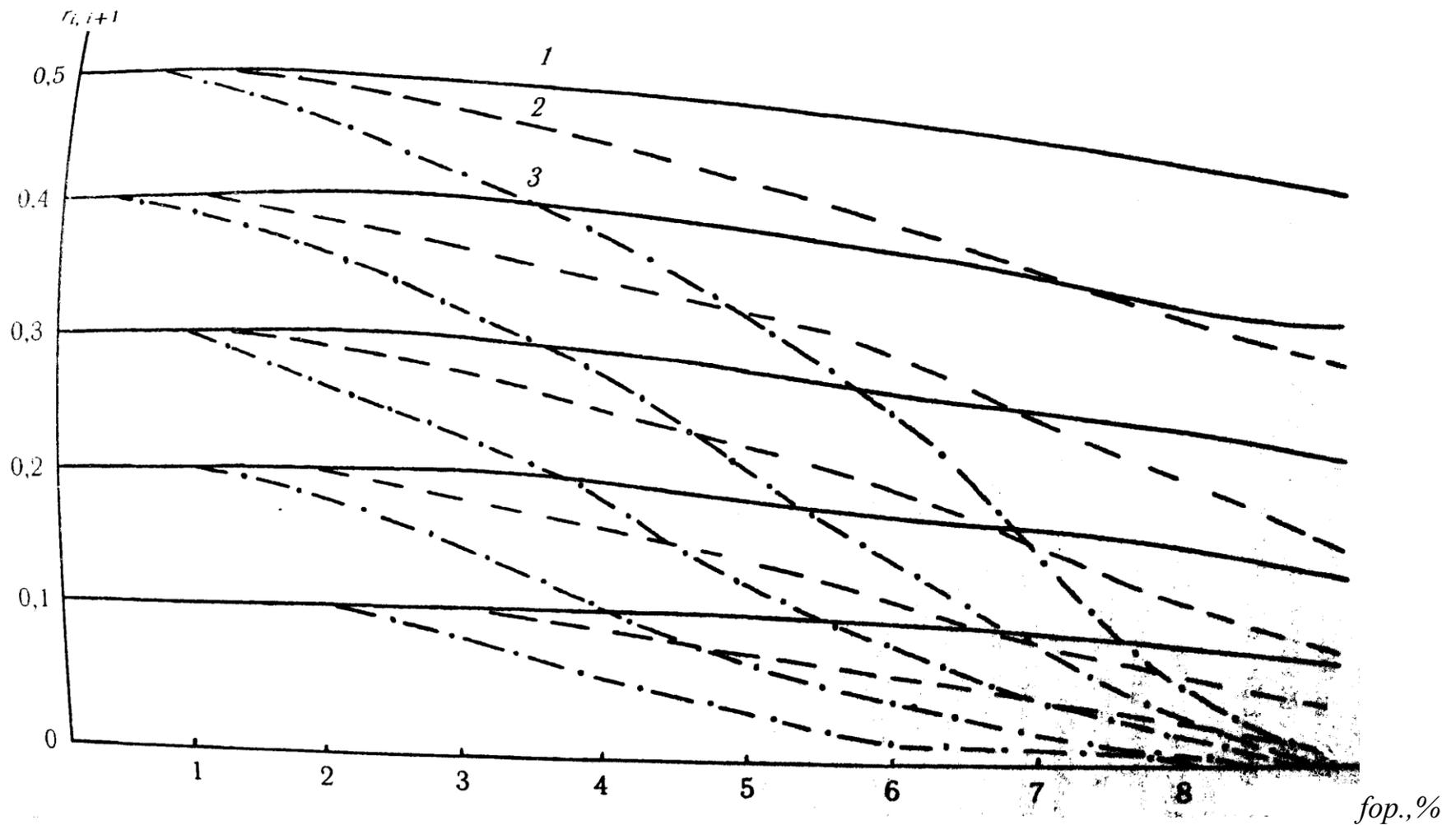


Рис. 5.2 Изменение коэффициентов корреляции между стоком смежных лет с ростом площади орошаемых земель при норме естественного стока $\bar{Y}_E = 20 \text{ мм}$

1- уровень оптимального увлажнения почвы $v_0 = 1,0$; 2 - уровень оптимального увлажнения почвы $v_0 = 0,9$; 3 - уровень оптимального увлажнения почвы $v_0 = 0,8$;

параметры, а поправочные коэффициенты

$$k = \frac{A_f}{A_0}, \quad (5.71)$$

где A_0 - значение того или иного статистического параметра годового стока в естественных условиях; A_f - значение параметра бытового стока при заданных показателях антропогенного влияния.

Зависимости k от показателей уровня хозяйственного освоения территории аналогичны исходным зависимостям для соответствующих статистических параметров (см.рис.5.1): влияние антропогенных факторов усиливается по мере увеличения площадей, которые оказались под влиянием водохозяйственных преобразований, а также по мере перехода от зоны достаточного увлажнения к зоне недостаточного. Косвенным показателем общего увлажнения территории может служить норма естественного годового стока. Результаты моделирования представляются в графическом или табличном виде, в которых поправочные коэффициенты k являются функцией нормы естественного годового стока, уровня хозяйственного освоения водосборов, заданного в виде относительных площадей, подверженных антропогенному влиянию в совокупности с другими неслучайными показателями антропогенного влияния (например, ξ, η).

При наличии трех вышеописанных факторов антропогенного влияния, наиболее характерных для зоны недостаточного увлажнения Украины, совместный учет влияния факторов хозяйственной деятельности выполнялся на основе следующего выражения

$$A_f = A_0(k_1 + k_2 + k_3 - 2) ; \quad (5.72)$$

при наличии двух факторов хозяйственной деятельности -

$$A_f = A_0(k_1 + k_2 - 1) , \quad (5.73)$$

где k_1, k_2, k_3 - коэффициенты, численно учитывающие антропогенное влияние на статистические параметры годового стока;

k_1 - поправочный коэффициент к статистическим параметрам естественного годового стока, учитывающий влияние потерь на дополнительное испарение с водной поверхности искусственных водоемов на годовой сток;
 k_2 - поправочный коэффициент к статистическим параметрам

естественного годового стока, учитывающий влияние заборов воды из местных водных ресурсов на годовой сток;

k_3 - поправочный коэффициент к статистическим параметрам естественного годового стока, учитывающий влияние сброса возвратных вод с массивов, орошаемых за счет реки-донора на годовой сток.

Адекватность расчетной модели бытового стока наблюдаемым данным была подтверждена соответствием расчетных и эмпирических кривых распределения годового стока рек с нарушенной хозяйственной деятельностью режимом (рис.5.3).

Примененная автором детерминированно-стохастическая модель годового стока в условиях антропогенного влияния была использована для оценки параметров бытового стока неизученных или малоизученных рек юга Украины (зона недостаточного увлажнения), где забор воды из местного стока для целей орошения в верховьях сочетается со сбросом вод из водораспределительных каналов оросительных систем в устьевые части рек, а водохранилища, не обладая значительной регулирующей способностью, играют роль искусственных испарителей [63,66].

В табл. 5.1–5.3 приведены результаты расчетов характеристик годового стока рек северо-западного Причерноморья в нарушенных хозяйственной деятельностью условиях. Для определения коэффициентов антропогенного влияния, обусловленного дополнительным испарением с водной поверхности искусственных водоемов необходимо располагать данными об относительной площади искусственных водоемов f_B , а также значениями норм естественного годового стока, рассчитанного по данным о климатическом стоке \bar{Y}_K . При расчетах можно использовать графические, табличные и аналитические зависимости (5.46) и (5.47).

Установлено, что несмотря на значительное число прудов и водохранилищ в южных регионах, их относительная площадь в пределах водосборов невелика (<1%), в результате чего поправочные коэффициенты к норме годового естественного стока близки к 1 (табл.5.1), а сами изменения находятся в пределах 10%.

Однако, бытовой сток маловодных лет при незначительном уменьшении среднего арифметического значения может оказаться близким к нулю, что происходит за счет возрастания многолетней изменчивости и асимметрии годового стока при наличии на водосборе искусственных водоемов (табл.5.2).

Помимо забора воды на орошение из местных водных ресурсов на территории северо-западного Причерноморья в формировании годового стока участвуют также возвратные воды с массивов, орошаемых реками – донорами: Дунай и Днестр [177,226].

На смену водоемам, выполняющим сезонное регулирование стока

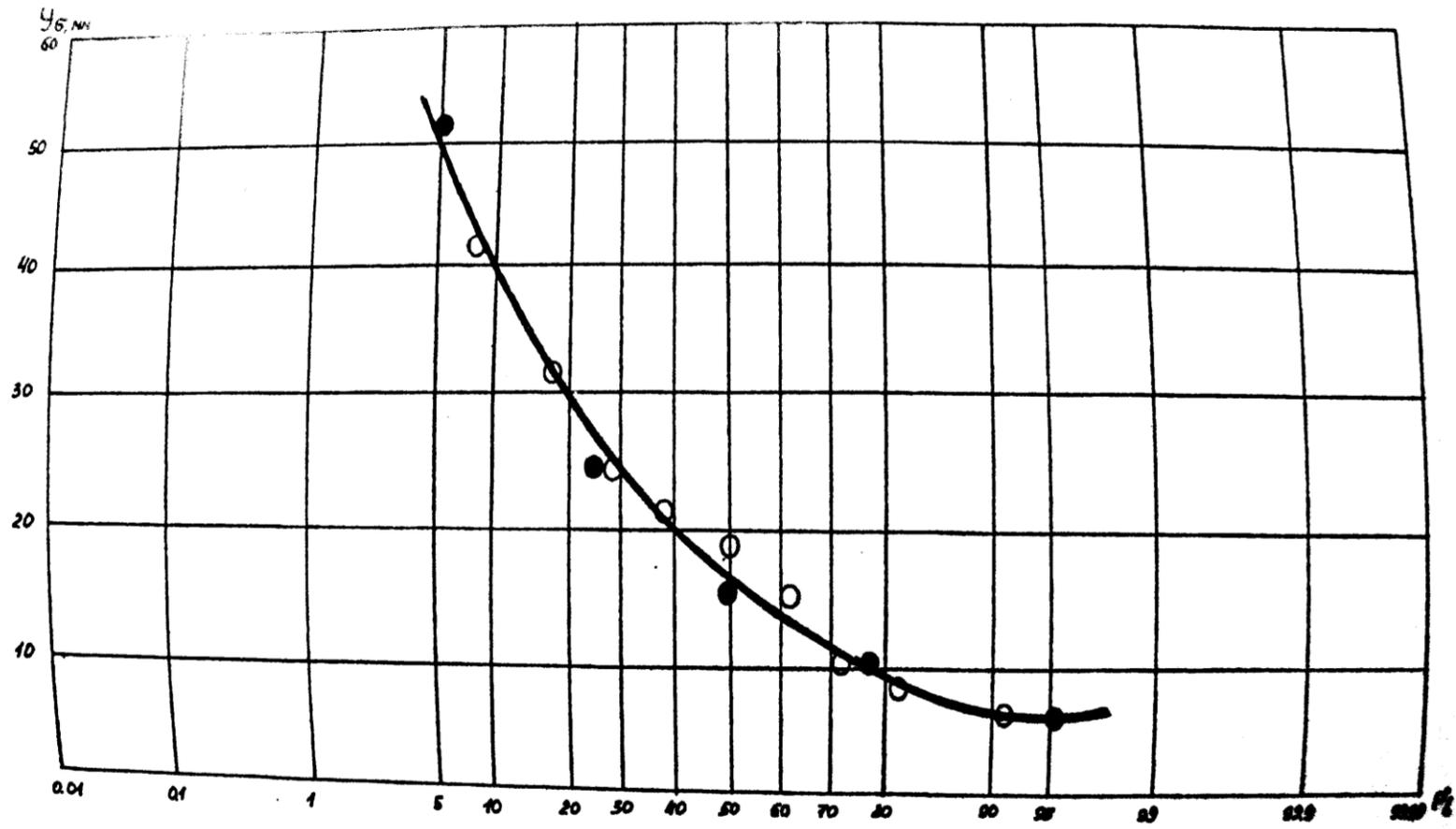


Рис.6.3 Кривая обеспеченности годового стока в нарушенных хозяйственной деятельностью условиях, построенная по результатам стохастического моделирования для водосбора р. Сарата – устье (точки • соответствуют наблюдаемым данным)

Таблица 5.1 - Изменение норм годового стока северо-западного Причерноморья за счет потерь на дополнительное испарение с поверхности искусственных водоемов

Река - устье	Норма естественного стока \bar{Y} , мм	Относительная площадь водной поверхности f_B , %	Коэффициент влияния дополнительного испарения $k_{1,\bar{Y}} = \frac{\bar{Y}_B}{\bar{Y}_E}$
Барабой	5,5	1,25	0,63
Сарата	6,9	0,34	0,88
Хаджидер	6,9	0,92	0,68
Алкалия	7,6	0,51	0,84
Малый Куяльник	8,6	0,38	0,88
Большой Куяльник	9,1	0,26	0,92
Тилигул	9,5	0,24	0,92
Когильник	10,5	0,53	0,95
Ягорлык	21,0	0,63	0,98
Кучурган	10,5	0,35	0,96
Савранка	28,9	0,72	0,99
Кодыма	28,9	0,28	0,98
Чичиклея	7,8	0,33	0,98
Гнилий Еланец	10,5	0,52	0,97
Громоклея	6,6	0,67	0,96

Таблица 5.2 - Статистические параметры бытового стока рек северо-западного Причерноморья в маловодные ($P = 75\%$) и многоводные ($P = 25\%$) годы при наличии на водосборе искусственных водоемов

Водосборы (река- устье)	Статистические параметры бытового стока			Слой бытового стока (мм) с обеспеченностью	
	\bar{Y}_B , мм	C_V	C_S	75%	25%
Барабой	4,2	2,6	3,6	0,0	25,3
Сарата	6,2	1,7	2,9	0,0	27,0
Хаджидер	4,7	2	3,4	0,0	22,9
Алкалия	6,3	1,9	2,8	0,0	30,2
М.Куяльник	1	2	2,2	0,0	5,0
Б.Куяльник	11	1,7	2,2	0,0	48,8
Тилигул	12	1,5	2	0,0	48,0
Когильник	10	1,4	2,2	0,3	38,3
Ягорлык	27	0,51	2,2	17,5	54,8
Кучурган	13	1,12	2,1	2,7	42,1
Савранка	35,6	0,6	1	20,0	75,8
Кодыма	20	0,9	1,4	6,9	55,1
Чичиклея	9,7	0,8	1,3	4,0	24,6
Гнилий Еланец	2,3	0,8	1,3	0,9	5,8
Громоклея	8,4	1,6	2,8	0,0	35,3

Таблица 5.3 - Изменение статистических параметров годового стока (нормы и коэффициентов вариации) рек северо-западного Причерноморья при орошении водами реки-донора

Река -устье	Параметры естественного стока			Относительные площади орошаемых массивов	Коэффициенты влияния возвратных вод	
	\bar{Y} , мм	C_v	C_s		f_{op} , %	$k_{3,\bar{Y}}$
Сарата	6,90	1,7	2,9	6,2	2,8	0,35
Хаджидер	6,90	1,7	2,9	13,9	2,0	0,50
Алкалия	7,60	1,6	2,7	26,8	2,4	0,43
Малый Куяльник	11,0	1,2	2,1	10,6	1,6	0,48
Большой Куяльник	12,0	1,2	2,1	3,4	1,2	0,86
Кучурган	14,0	1,09	1,9	0,32	1,05	0,99
Когильник	14,0	1,09	1,8	1,3	1,2	0,83

за счет местных водных ресурсов [163], пришли водохранилища, заполняемые дунайскими и днестровскими водами. Некоторые водотоки целиком становятся частью этой системы. Так, например, р.Фонтанка (правый приток р.Когильник) используется как сбросной канал коллекторно-дренажных вод. Среднемноголетняя величина ее бытового стока превышает 100мм, при норме климатического стока, равной 15мм. Результаты имитационных экспериментов по данным начала 90-х годов прошедшего столетия (табл.5.3) показали, что сброс вод с массивов, орошаемых рекой-донором, может увеличить вдвое сток малых рек. Дополнительное поступление воды обеспечивает также “выравнивание” распределения стока в маловодные и многоводные годы, т.е. приводит к снижению коэффициента вариации годового стока. Тем не менее, влияние забора воды на орошение из местных водных ресурсов не утратило своей значимости для отдельных рек. Так, например, в верховьях рек Дунай-Днестровского междуречья (на территории Молдовы) преобладает орошение за счет местных водных ресурсов, а в среднем и нижнем течении – за счет реки-донора.

В связи с этим суммарный коэффициент антропогенного влияния определялся по (6.72), т.е. с учетом того и другого вида орошения (за счет местного стока или за счет реки-донора), а также характеристик оросительных систем в верхнем и нижнем течении. Например, для рек Дунай-Днестровского междуречья в пределах Молдовы преобладает забор воды для целей орошения из местного стока при коэффициенте полезного действия оросительных систем, равного 0,9, и преимущественно приводораздельном и террасном положении орошаемых массивов, в то

Таблица 5.4 - Характеристики годового стока реки Большой Катлабух при различных факторах антропогенного влияния на водосборе (результаты моделирования)

Состояние водного объекта	Статистические параметры годового стока			Относительная площадь водной поверхности	Относительная площадь земель, орошаемых рекой-донором	Годовой сток заданной обеспеченности P , мм				
	Y , мм	C_v	C_s			f_B , %	f_{OP} , %	5	25	50
естественное	9.2	1.41	2.40	0.0	0.0	35	13	4.6	0.5	0.0
при наличии искусственных водоемов	6.1	1.89	3.20	1.3	0.0	29	7.8	1.4	0.0	0.0
орошение за счет реки-донора	11.0	1.24	2.40	0.0	4.5	39	15	6.1	1.6	0.0
Суммарный результат	7.9	1.72	3.2	1.3	4.5	34	9.9	2.3	0.0	0.0

время как в нижнем течении рек большие площади отведены под орошение за счет реки-донора (р.Дунай), при этом меняются и характеристики оросительных систем ($\eta = 0,75$) и положение орошаемых массивов (пойменные). Пример расчета характеристик бытового стока для неизученной реки с различными факторами хозяйственной деятельности приведен в табл.5.4.

Для оценки качества методики расчета статистических параметров бытового стока по результатам стохастического моделирования были также рассмотрены водосборы, на которых имеются наблюдения за бытовым стоком и существуют данные о характере антропогенного влияния. Проверочные расчеты, выполненные для водосборов рр.Ингул и Ингулец показали, что невязка водохозяйственного баланса находится в пределах $\pm 10\%$. Таким образом, можно сделать вывод, что методики учета влияния водохозяйственных преобразований на малых и средних реках зоны недостаточного увлажнения отражают реальную ситуацию с удовлетворительной точностью.

5.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТЫ ГОДОВОГО СТОКА ПРИ НАЛИЧИИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ НА ВОДОСБОРАХ РЕК ЗОНЫ ИЗБЫТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ УКРАИНСКОГО ПОЛЕСЬЯ)

Западная часть Украинского Полесья относится к числу регионов с нарушенной экосистемой [32,114,167,168,169,179,24]. Широкомасштабная мелиорация (осушение болот) с односторонне регулируемым стоком малых рек, начатая в 60-е годы, привела к резкому изменению условий формирования состава и качества воды в реках [70], а также к нарушению гидрологического режима грунтовых вод на прилегающих территориях, которые в 2 раза превышают поверхность целевого осушения [190].

Снижение уровня грунтовых вод на значительных территориях способствовало переосушению почв и, в конечном итоге, ухудшило их плодородие. В текущий момент происходит разрушение созданных гидромелиоративных комплексов, что может привести к трудно прогнозируемым изменениям водного режима рек, на водосборах которых осушение болот уже было выполнено [227]. В создавшихся условиях целесообразным является использование математического моделирования, позволяющего “проигрывать” различные водохозяйственные ситуации, создающиеся на водосборах рек, подверженных антропогенным преобразованиям.

5.4.1. Обоснование режима гидромелиораций в западной части Украинского Полесья. Северо-западная часть Украины относится к зоне избыточного и достаточного увлажнения. Если ресурсы увлажнения представить в виде норм годовых осадков \bar{X} , а теплоэнергетические ресурсы климата - в виде норм максимально возможного испарения \bar{E}_m , то

отношение $\beta_X = \frac{\bar{X}}{\bar{E}_m}$ можно рассматривать как характеристику

соразмерности тепла и влаги в пределах рассматриваемой территории. Изолиния $\beta_X = 1,0$ является границей между зоной избыточного и достаточного увлажнения. В первую (западную) зону попадают р. Западный Буг и левобережные притоки верхнего Днестра до р. Серет, где ресурсы увлажнения превышают теплоэнергетические ($\beta_X > 1,0$). Другими словами, эта часть территории находится в зоне избыточного увлажнения. Во второй (восточной) зоне расположена вся правобережная часть р. Припять, левобережные притоки р. Днестр в его среднем течении, верховья р. Южный Буг и притоки р. Днепр (рр. Уж, Ирша, Тетерев). Для второй зоны характерно медленно увеличивающееся к востоку превышение ресурсов тепла над ресурсами влаги ($\beta_X = 0,95 - 0,80$), что позволяет рассматривать её в дальнейшем как зону достаточного

увлажнения [236]. Если рассмотреть эту же характеристику β_X за вегетационный период, то выяснится, что она изменяется от 0,80 до 0,56, т.е. в вегетационный период климат исследуемой территории становится более засушливым. На рис.5.4 показано внутригодичное распределение ресурсов увлажнения $H = X + w_1 - w_2$, максимально возможного испарения E_m и величины $H - E_m$ для среднего года.

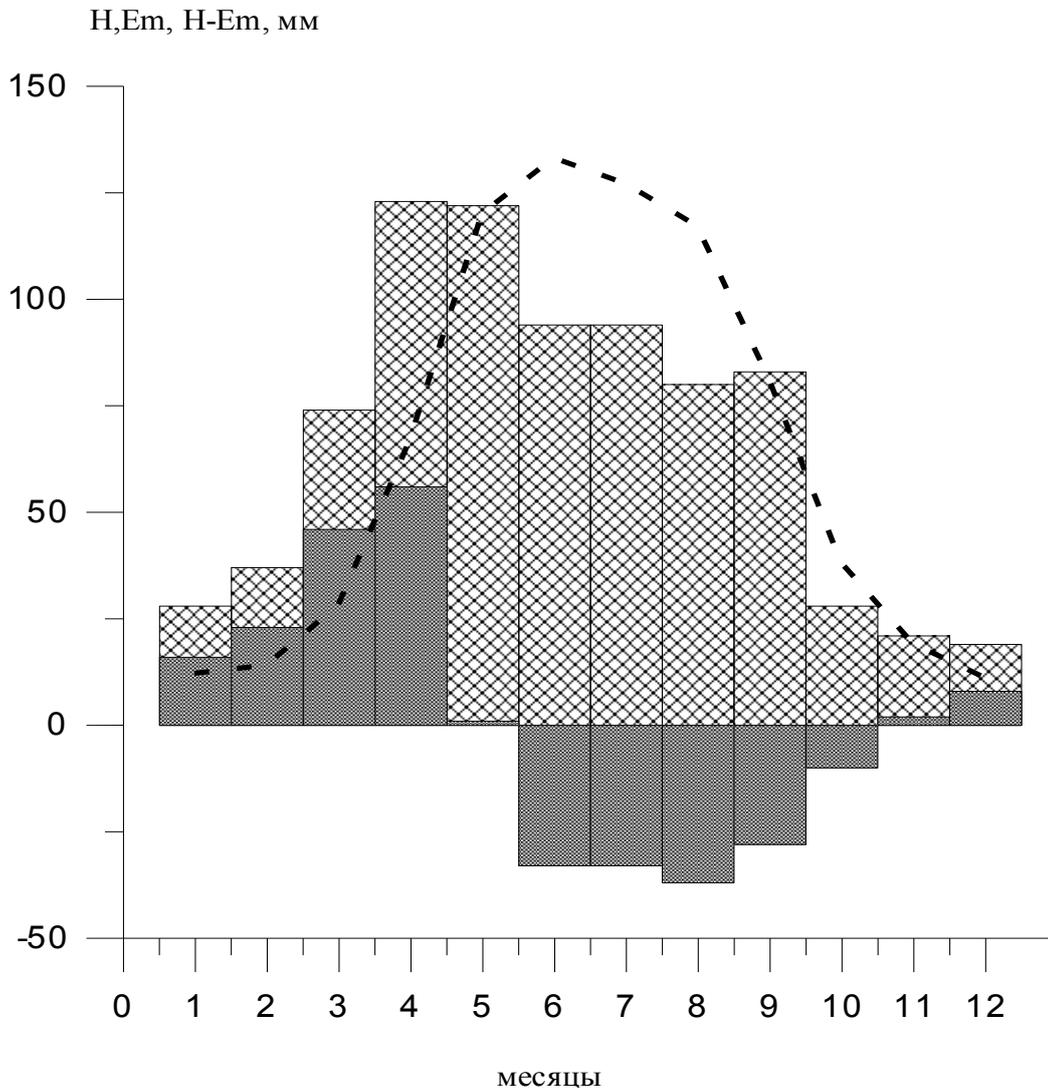
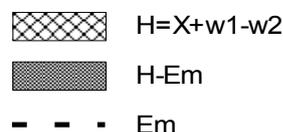


Рис. 6.4 Внутригодичное распределение ресурсов увлажнения H , максимально возможного испарения E_m и разности $(E_m - H)$ в средний по водности год, м. Овруч



Из его анализа следует, что в период с июня по октябрь теплоэнергетические ресурсы значительно превышают приток влаги, т.е. в вегетационный период будет наблюдаться недостаток увлажнения и, следовательно, почва будет нуждаться в орошении. Однако, западная часть Украинского Полесья относится к числу регионов с переувлажненной почвой. Дело в том, что не столько избыток выпадающих осадков, сколько близкое к поверхности расположение грунтовых вод и плоский рельеф создают условия для заболачивания.

Возвращаясь к понятию гидромелиоративных норм, описанному в п.5.3, необходимо отметить, что именно в пределах рассматриваемого региона, при оценках разности ΔH между фактическим H и оптимальным H_0 увлажнением необходимо учитывать дополнительную величину g , характеризующую приток грунтовых вод в корнеобитаемый слой (см 5.60). В условиях мелиораций, когда $w_1' = w_2'$, величина $\Delta H = m_0$ записывается в виде

$$m_0 = X + g - v_0^r E_m, \quad (5.74)$$

Величина m_0 представляет собой норму осушения в случае избыточного увлажнения ($H > H_0$) и поливную норму - в случае недостаточного увлажнения ($H < H_0$).

Для определения m_0 необходимы данные о величине g . Для решения этой задачи составляющие уравнения (5.74) представляют в долях от величины E_m

$$\beta_{mg} = \beta_{Hg} - v_0^r, \quad (5.75)$$

в котором составляющая β_{Hg} определяется по (2.22) и (2.27), тогда

$$\beta_{mg} = \left\{ \left[k_g + (1 - k_g) \left(1 + \beta_H^{-n} \right)^{-\frac{1}{n}} \right]^{-n} - 1 \right\}^{-\frac{1}{n}} - v_0^r, \quad (5.76)$$

где k_g - коэффициент, связанный с уровнем грунтовых вод (2.19).

В этом случае (5.74) примет вид

$$m_0 g = \beta_{mg} E_m \quad (5.77)$$

Расчет величин ΔH и гидромелиоративных норм M_0 был выполнен как для условий глубокого залегания грунтовых вод ($g = 0$), так и близкого

($g \neq 0$), за период вегетации (апрель – октябрь) для разных уровней оптимального увлажнения почвы ($v_0 = 1.0$ и $v_0 = 0.8$) с использованием данных 30 агрометеорологических станций, расположенных в пределах изучаемого региона и на сопредельных территориях [143].

Установлено, что для влаголюбивых культур ($v_0 = 1,0$) при глубоком залегании грунтовых вод ($g = 0$) и преобладании песчаных почв $r = 1,5$ $\Delta H < 0$ гидромелиоративная норма M_0 представляет собой сумму поливных норм, для случая, когда $X < v_0^r E_m$ и $m_0 < 0$. Величины M_0 изменяются от -260 мм на востоке до -140 мм на западе (знак “-” обозначает наличие дефицита влаги).

Для засухоустойчивых культур ($v_0 = 0,8$) при этих же условиях для разных станций отмечен как избыток $\Delta H > 0$, так и недостаток ресурсов увлажнения $\Delta H < 0$. В результате получено, что в западной части исследуемой территории для произрастания засухоустойчивых культур необходимы осушительные мелиорации, а восточной - оросительные (рис.5.5а). При этом максимум норм осушения приходится на станции с наиболее высокими высотными отметками, расположенных вблизи водораздела между бассейнами р.Западный Буг и р.Днестр (Гологоры). Дело в том, что гидромелиоративные нормы, рассчитанные без учета влияния грунтовых вод ($g = 0$), отражают, главным образом, изменения только климатических факторов, не принимая во внимание роль подстилающей поверхности. При увеличении высоты местности осадки возрастают, а теплоэнергетические ресурсы, обусловленные температурами воздуха, снижаются, что и обеспечивает предпосылки для переувлажнения. Оросительные нормы изменяются от -40 мм на востоке до 0 на западе, осушительные – от 60 мм на юго-западе до 0 мм на северо-востоке.

В случае учета влияния грунтовых вод ($g \neq 0$) как при $v_0 = 0,8$, так и при $v_0 = 1,0$ на исследуемой территории наблюдается избыток увлажнения ($\Delta H > 0$), при котором для обеспечения оптимального увлажнения почвы необходимы гидромелиорации в виде осушения. Максимум норм осушения перемещается в Полесскую низменность (рис.5.5 б). Для $v_0 = 0,8$ нормы осушения изменяются от 850 до 500 мм, для $v_0 = 1,0$ - от 700 до 250 мм.

Рис.5.5 б соответствует случаю $\frac{h_{\Gamma}}{h_k} = 1,0$, что отвечает условиям

подпора грунтовыми водами капиллярной каймы. Последнее справедливо для заболоченных территорий при средней глубине залегания грунтовых вод на болотах, равной $0,5 - 1$ м [109].

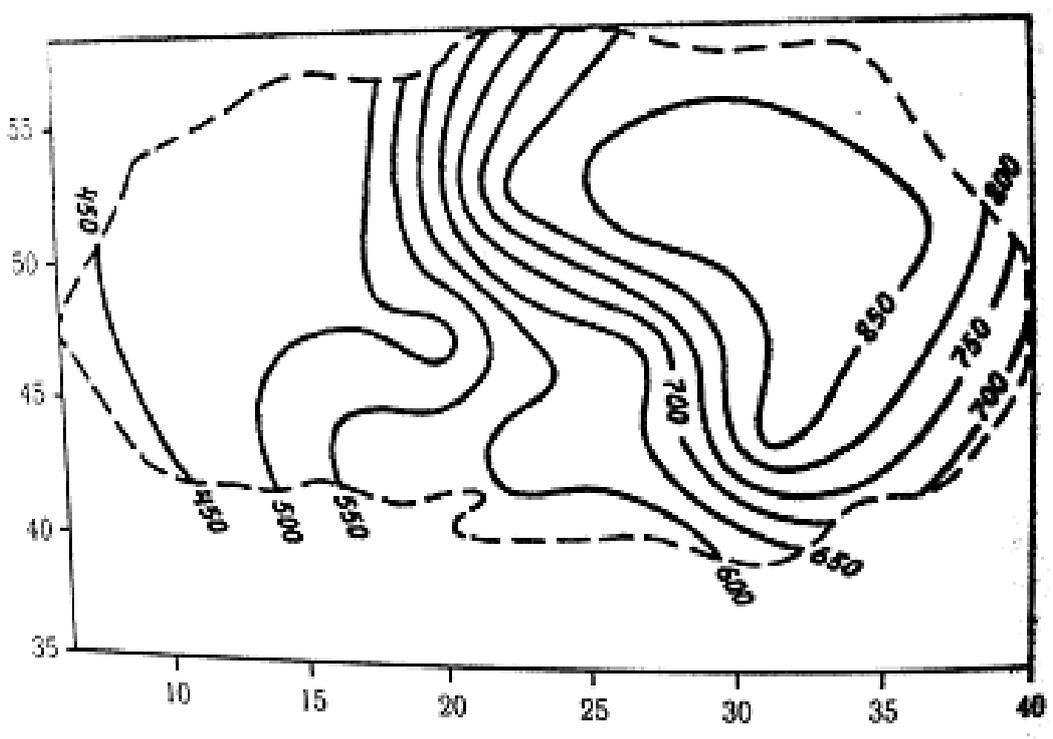
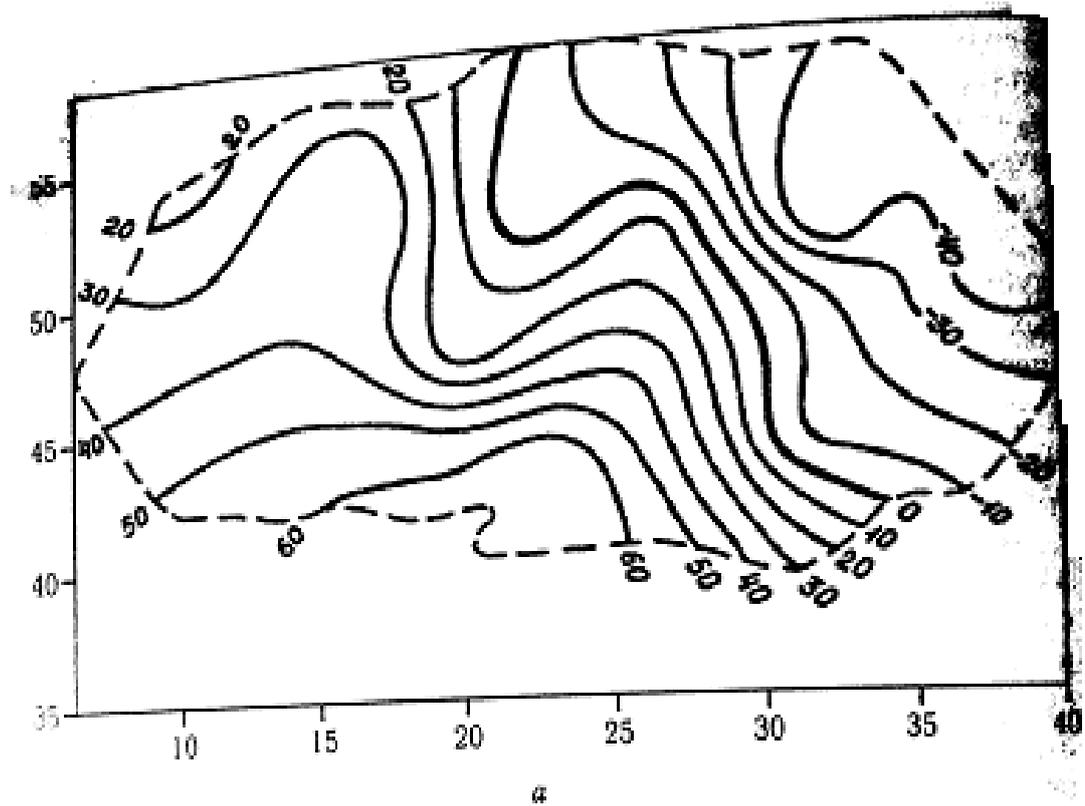


Рис.5.5 Изолинии гидромелиоративных норм при оптимальной влажности почвы $v_0 = 0,8$
 а) без учета грунтовых вод; б) с учетом грунтовых вод;
 - - - граница рассматриваемой территории

Нами также были рассчитаны гидромелиоративные нормы с учетом глубины залегания грунтовых вод, которая изменяется по территории от 0,5 до 16м (использованы данные метеостанций).

При этом максимальные величины h_{Γ} соответствуют водоразделу между р.Припять и р.Днестр. Для оценки гидромелиоративных норм в этом случае рассчитывался коэффициент k_g (2.21). Высота капиллярного поднятия h_k определялась в соответствии с уравнением (2.20), в зависимости от наименьшей влагоемкости. Установлено, что более легким почвам ($r = 1.5$) соответствует высота капиллярного поднятия, равная 1,7м, а более тяжелым ($r = 2$) – 2.0 -2.7м. Если принять фактическую глубину залегания грунтовых вод, измеряемую на суходолов в качестве расчетной, то избыток влаги будет наблюдаться только на северо-западе. При расчетах для глубины залегания грунтовых вод повсеместно равной 2м установлено, что осушению подлежит вся территория.

Полученные оценки гидромелиоративных норм свидетельствуют о необходимости тщательного анализа режима увлажнения западной части Украинского Полесья и могут быть использованы при обосновании и планировании различного рода гидромелиоративных мероприятий. Установленные результаты показывают, что для западной части Украинского Полесья недопустимо осушение болот с односторонним регулированием режима осушительных систем, так как в зависимости от вида выращиваемых культур в вегетационный период может формироваться как избыток, так и недостаток потребления воды растениями. Таким образом, для предотвращения переосушения почв и создания условий благоприятного развития сельскохозяйственных культур в пределах исследуемой территории необходимо двухстороннее регулирование водного режима [59,70,75], при котором осушительная система работает в условиях переменных климатических факторов и может обеспечивать необходимой влагой различные сельскохозяйственные культуры в вегетационный период.

5.4.2. Обзор методов количественной оценки влияния осушения болот на годовой сток рек. В отношении влияния осушения болот на сток рек существуют различные мнения (И.И.Жилинский,1899; В.В.Докучаев,1876; Н.Н.Никитин,1900; В.В.Оппоков,1909; А.Г.Булавко,1961; С.М.Новиков,1978; С.И.Харченко,1978; В.Ф.Шебеко,1983; и др.). При исследовании колебаний стока мелиорируемых водосборов наиболее сходны выводы в отношении изменений меженного стока: осушение болот способствует выравниванию внутригодового распределения стока – увеличению минимальных расходов и стока за меженные периоды, что объясняется улучшением процесса стекания поверхностных и подземных вод в преобразованную русловую сеть. По данным А.Г.Булавко, а также К.А.Клюевой и Ю.М. Покумейко

[36,38,105], увеличение летне-осеннего меженного стока рек Белорусского Полесья после осушения составляет от 16 до 200%. Приведенные различными авторами столь разные выводы о влиянии осушительной мелиорации на максимальный сток обусловлены влиянием нескольких факторов – увеличением потерь талых и дождевых вод за счет роста зоны аэрации, с одной стороны, и наличием развитой искусственной гидрографической сети, - с другой [85]. Важное значение имеет также разница в коэффициентах фильтрации [169]. В результате сложного сочетания этих факторов и происходит в одних случаях уменьшение максимального стока, а в других – увеличение.

Большинство полученных выводов о влиянии осушения болот основано на сопоставлении наблюдений за стоком мелиорируемых водосборов и водосборов в естественных условиях. Достоверность таких результатов определяется длительностью наблюдений за стоком в период естественного и нарушенного хозяйственной деятельностью водного режима. Второе направление работ по исследованию влияния осушения болот на сток рек связано с дифференцированным подходом к факторам, определяющим сток с осушенных водосборов. При этом рассматривается уравнение водохозяйственного баланса водосбора, согласно которому изменение объема годового стока под влиянием осушения болот ΔW_{OC} можно представить следующим образом [263,264]

$$\Delta W_{OC} = \Delta W_{CP} \pm \Delta W_{EB} , \quad (5.78)$$

где ΔW_{CP} - объем сработки вековых запасов подземных вод;

ΔW_{EB} - изменения объема воды за счет изменения испарения на водосборе в результате осушения.

В методе ГГИ [173] объем сработки ($км^3$) представляется в виде

$$\Delta W_{CP} = (Y_{B,OC} F_{B,OC} + Y_{СУХ} F_{СУХ}) \cdot 10^{-3} , \quad (5.79)$$

где $Y_{B,OC}$ - слой сработки болотных вод, м; $Y_{СУХ}$ - слой сработки с осушенных суходолов, м; $F_{B,OC}$ - площадь осушенных болот и заболоченных земель, $км^2$; $F_{СУХ}$ - площадь суходолов, примыкающих к болотам и находящихся под влиянием осушения, $км^2$.

Определение слоя воды, срабатываемого в русловую сеть в результате уменьшения влажности верхнего слоя залежи при снижении уровня воды на болоте, определяется по выражению

$$Y_{\Delta H} = \Delta H_{OC} (w_{ECT} - w_{OC}) ; \quad (5.80)$$

$$\Delta H_{OC} = (H_E - H_{OC}), \quad (5.81)$$

где H_E, H_{OC} - средние годовые уровни болотных вод соответственно до и после осушения, м;

ΔH_{OC} - изменение среднего уровня грунтовых вод в результате осушения, м;

w_{OC} - объемная влажность торфяной залежи после осушения.

Слой воды, стекающий с прилегающих к оросительной системе суходолов, по этой же методике оценивается следующим образом

$$Y_{СУХ} = \Delta H_{СУХ} \mu , \quad (5.82)$$

где $\Delta H_{СУХ}$ - среднее значение снижения уровня грунтовых вод на прилегающих участках суходола, м; μ - коэффициент водоотдачи почвогрунтов.

Наибольшие трудности возникают при определении $\Delta H_{СУХ}$ и $F_{СУХ}$. Площадь суходолов, находящихся под влиянием осушения, прежде всего определяется шириной зоны влияния мелиораций на окружающие территории, которая в зависимости от гидрогеологических условий изменяется в широких пределах. Обобщение данных, выполненных В.Ф. Шебеко [256,257], позволяет определить ширину зоны влияния осушения при снижении уровня воды на болоте на 1,0-1,5 м для различных грунтов прилегающих территорий. Указанные данные могут быть применены для определения приближенных значений $\Delta H_{СУХ}$ и $F_{СУХ}$.

Объем потерь воды за счет изменения испарения в бассейне определяется по формуле

$$\Delta W_{ЕБ} = (E_{БОЛОТ} - E_{OC}) F_{OC} \cdot 10^{-6} , \quad (5.83)$$

где $E_{БОЛОТ}$ - испарение с неосушенного болота, мм; E_{OC} - испарение с осушенного болота, мм; F_{OC} - площадь осушенных земель, км².

Другое направление исследований влияния осушения на сток заключается в изучении изменений водно-физических и гидрологических свойств почво-грунтов, а также условий стекания влаги после осушения. К этому направлению относятся работы А.Н. Бефани[18], В.Ф.Шебеко[256,257], Я.А. Мольчака[167], С.И.Харченко[245].

На ранних этапах исследования влияния осушения болот на сток рек допускалось, что сработка запасов подземных вод происходит только в

первые годы после проведения осушительных мелиораций. Как показали исследования П.О. Киселева (1964), С.М. Новикова (1976), Н.А. Мишустина (1979), Я.А. Мольчака Я.А. (1999) при наличии напорных вод стабилизации уровня грунтовых вод в процессе осушения не наступает, так как происходит дополнительный приток напорных межпластовых вод в верхние водоносные горизонты грунтовых вод. Именно по этой причине проведение мелиоративных работ в зоне болот Полесской низменности привело к изменению взаимосвязи речных и подземных вод в системе речная сеть - подземный приток [70]. По данным Я.А. Мольчака [168], практически на всех речных системах с осушительными мелиорациями наблюдается увеличение годового стока на 21-114%. При этом доминирующая роль принадлежит подземной составляющей. В работе [164] для Белорусского Полесья приведена зависимость коэффициента изменения подземного стока $K_{ИЗМ,П}$ от степени канализации a , которая определяется размерами элементов проводящей осушительной сети (их длиной и глубиной)

$$K_{ИЗМ,П} = \frac{\bar{Y}_{ОС,П}}{\bar{Y}_{Е,П}} \quad (5.84)$$

и

$$K_{ИЗМ,П} = 2.4th(a) + 1 \quad (5.85)$$

где $\bar{Y}_{ОС,П}$ - средняя величина подземного притока после проведения осушительных мелиораций;

$\bar{Y}_{Е,П}$ - средняя величина подземного притока до проведения осушительных мелиораций.

Чем больше степень канализации a , тем больше больше изменения стока на осушаемых территориях.

В работе О.З. Реверы [190] выполнена интегральная оценка изменений годового и минимального стока за период осушения болот. При этом отмечается, что распределение болотных массивов на водосборе значительно отличается от распределения мелиорированных площадей в связи с тем, что осушительным мелиорациям подвергаются не только болота, но и заболоченные и переувлажненные земли. По этой причине уровень мелиорированности отдельных водосборов намного больше их относительной заболоченности. В качестве показателя мелиорированности водосбора следует использовать средний процент мелиорированности, вычисленный за период нарушенного стока. Начало периода нарушенного стока определялось автором путем анализа динамики площадей осушения на водосборах, кривых последовательных сумм (двойных интегральных кривых) годового (сезонного) стока и осадков, минимального, месячного и

годового стока. В основу методики положено определение коэффициента изменения стока $K_{ИЗМ}$ в условиях осушения, который представляет собой отношение средних значений стока до и после осушения

$$K_{ИЗМ} = \frac{\bar{Q}_{МЕЛИОР}}{Q_{ЕСТ}}, \quad (5.86)$$

где $\bar{Q}_{МЕЛИОР}$ - средняя величина стока за период мелиораций;

$Q_{ЕСТ}$ - средняя величина стока за ненарушенный хозяйственной деятельностью период.

Полученные эмпирические зависимости (раздельно для Волынского и Житомирского Полесья) $K_{ИЗМ} = f(f_{ОС})$ описывают увеличение средних величин стока с ростом показателя мелиорированности $f_{ОС}$.

В работе Я.А. Мольчака [168] оценка площади влияния осушения на водный режим прилегающих территорий дана на основе расчетов снижения уровня грунтовых вод (УГВ) при удалении от границы мелиоративных систем с учетом коэффициента фильтрации почвы, средней толщины водоносного горизонта, водоотдачи грунта в частях от объема. Согласно выполненным расчетам в зоне Полесья, площадь влияния колеблется от 2 до 3 га на 1га осушенных земель.

Роль второго слагаемого $\Delta W_{ЕБ}$ в балансовом уравнении (5.78) определяется характером освоения осушенных болот. Непосредственное влияние осушения и освоения болот на процессы испарения связано с уменьшением влажности торфяной почвы после снижения уровня грунтовых вод, сменой вида растительности и изменением транспирационной способности. Целесообразно рассмотреть испарение на болотах неосушенных, осушенных, но не освоенных, и на освоенных под посевы сельскохозяйственных культур. В качестве величины испарения с неосушенных торфяников многими авторами принималось испарение с водной поверхности [36-38]. В работе [164] указывается, что за весь период вегетации суммарное испарение с торфяников и водной поверхности отличается мало, но в период усиленной транспирации испарение с торфяников выше, чем испарение с водной поверхности.

Согласно исследованиям В.Ф. Шебеко [256,257], только весной вследствие достаточного увлажнения почв и незначительной транспирации, испарение с осушенных и неосушенных болот практически не меняется. В летний период месячное испарение на осушенных, но не освоенных болотах, и его сумма за теплый период (апрель – сентябрь) уменьшается в среднем на 10-15%, а в особенно засушливые месяцы и при глубоких грунтовых водах – на 40%. Это связано не только с понижением грунтовых вод при осушении, но и с уменьшением транспирации

изреженного, вырождающегося травостоя. При освоении осушенных болот испарение вновь возрастает за счет транспирации влаги сельскохозяйственными культурами. Следует отметить, что сельскохозяйственные культуры при своем развитии (транспирации) потребляют гораздо больше влаги, чем естественная болотная растительность. Так, для естественной болотной растительности транспирация составляет 10-25% от суммарного испарения, а для культурных трав – 90%. Испарение на освоенных болотах зависит от степени регулирования почвенной влаги гидромелиоративными мероприятиями. Если система осушения предусматривает пополнение влагозапасов зоны аэрации до максимального равновесного влагосодержания, то испарение с поверхности осушенных болот увеличивается, по сравнению с неосушенными болотами, для культур с повышенным оптимальным увлажнением почвы (травы, овес, ячмень, конопля). Если же оптимальное увлажнение, необходимое для развития данной культуры, невелико (свекла, картофель), то испарение с осушенных и освоенных болот может оказаться даже меньше, чем испарение с неосушенного болота. Если осушение глубокое и дополнительного увлажнения в вегетационный период нет, то испарение с поверхности освоенного болота будет уменьшаться по сравнению с неосушенным.

Изменение слоя годового стока в результате осушения болот, согласно (5.83), будет равно разности испарения с болот и испарения с осушенной и освоенной территории.

Исходя из приведенных выше соображений, для учета влияния заболоченности была предложена следующая формула [164]

$$\bar{Y}_{f_B} = Y_{f_B=0} - (\bar{E}_B - \alpha_1 \bar{E}_C) f_B \quad (5.87)$$

или

$$k_B = 1 - k_{ИЗБ} \frac{F_B}{F} \quad (5.88)$$

где $k_B = \frac{\bar{Y}_{f_B}}{\bar{Y}_{f_B=0}}$ - коэффициент, равный отношению нормы стока с заболоченного водосбора с площадью болот F_B , к норме стока с незаболоченного бассейна;

f_B - относительная площадь, занятая болотами.

$k_{ИЗБ}$ - коэффициент избыточного испарения, равный

$$k_{ИЗБ} = \frac{\bar{E}_B - \alpha_1 \bar{E}_C}{\bar{Y}_{f_B=0}} \quad (5.89)$$

и представляющий собой характеристику избыточного испарение с поверхности суши;

где \bar{E}_B - среднемноголетнее испарение с болот;

\bar{E}_C - среднемноголетнее испарение с суходолов;

α_1 - коэффициент, зависящий от севооборота осваиваемой территории;

$\bar{Y}_{f_B=0}$ - среднемноголетний слой стока с незаболоченных территорий.

В соответствии с полученными результатами, Н.А. Мишустин пришел к выводу, что k_B может быть как больше, так и меньше 1, в зависимости от вида произрастающих сельскохозяйственных культур на освоенных болотах. Полученный результат подтверждает вывод К.Е.Иванова о том, что норма испарения годового стока в результате осушительной мелиорации не изменится при использовании осушенных болот под интенсивное сельскохозяйственное производство с высокой агротехникой и регулируемым водным режимом.

Описанные выше результаты и выводы многих авторов позволяют сделать вывод о том, что осушительная мелиорация способствует увеличению среднего годового стока. Это происходит за счет сработки запасов грунтовых вод, увеличения густоты речной сети, уменьшения длительности затопления пойм и некоторых других факторов.

5.4.3. Обоснование математической модели, описывающей влияние осушительных мелиораций на годовой сток. Сравнение величин подземного притока в реки, рассчитанных приближенным методом (как полусумма модулей стока 30-ти суточных минимумов за летнюю и зимнюю межень), и по генетической формуле А.Н.Бэфани [16,17] показало [139], что нормы подземного притока в реки Полесской низменности, определенные генетическим методом, ниже величин подземного стока, рассчитанных приближенным методом (рис.5.6). Это может быть объяснено повышением дренажного стока с водосборов, обусловленного работой осушительных систем одностороннего регулирования. На рис.5.7 отчетливо выражен временной тренд (направленное изменение во времени) в колебаниях подземного стока с водосбора р.Вурка – с.Сварыни. Начало тренда приходится на 60-е годы, коэффициент линейной корреляции подземного стока со временем равен 0,82. По данным работы [70], эта река характеризуется наличием значительного дренажного стока с осушаемых территорий и входит в состав

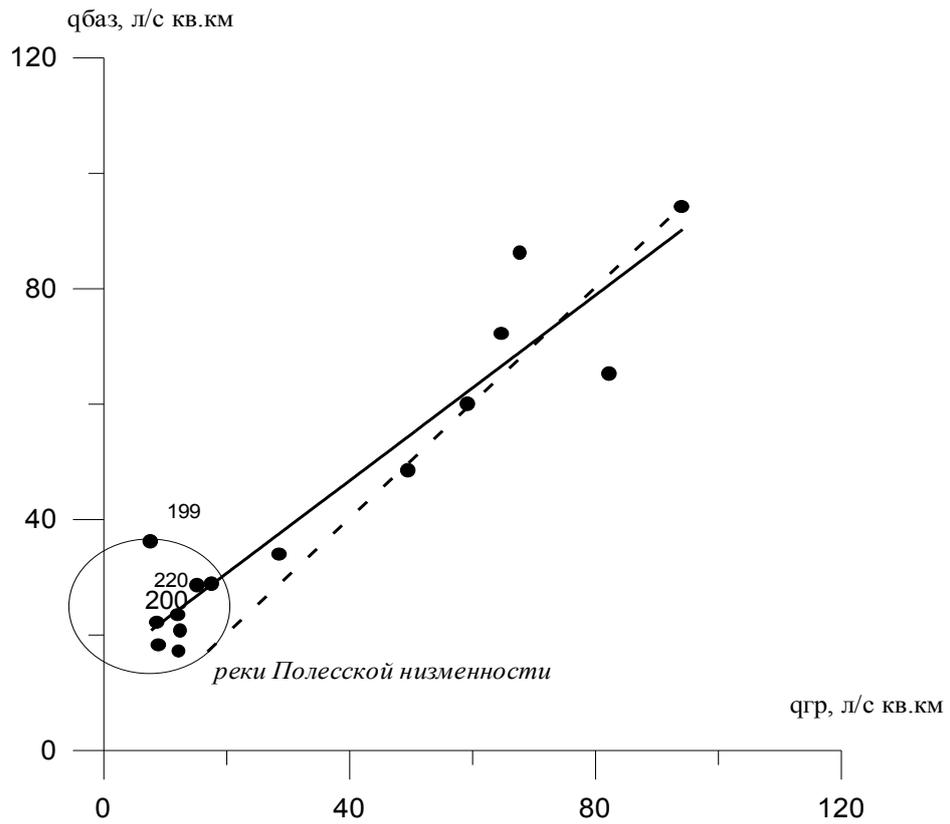


Рис.5.6 Сравнение норм подземного притока в реки, рассчитанных по генетическому методу ($q_{ген.}$) И приближенному методу ($q_{баз.}$), цифры у точек – номера постов, ----- линия равных значений

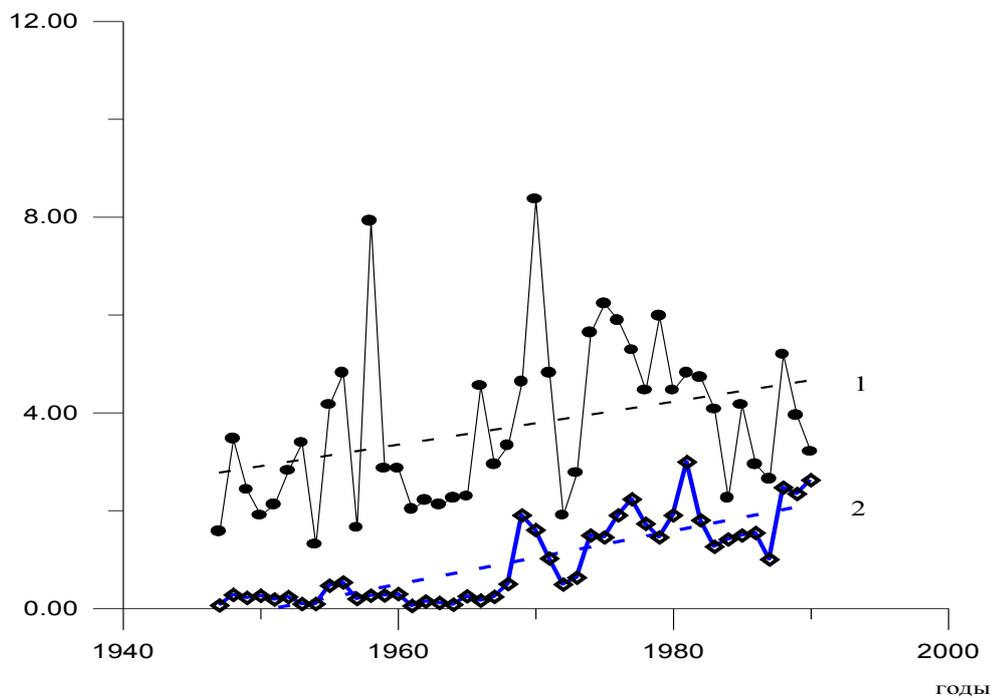


Рис.6.7 Совмещенные хронологические графики годового (1) и подземного (2) стока с водосбора р.Вырка - с. Сварыни ----- временной тренд

мелиоративной осушительной системы. Таким образом, вывод о том, что именно изменение подземного притока в реки обуславливает рост суммарного годового стока рек западной части Украинского Полесья при осушении болот нашел свое подтверждение.

Как уже отмечалось, составляющую водохозяйственного баланса при осушении болот на водосборах ΔW_{CP} можно представить в виде трех слагаемых. Первое обусловлено непосредственно снижением уровня грунтовых вод, второе – потерями влаги за счет уменьшения влажности верхнего слоя залежи при снижении уровня воды на болоте, третье – изменениями испарения на осушенных водосборах.

Нами в разделе 2.3 для западной части Украинского Полесья были выполнены расчеты коэффициентов влияния болот k_B с использованием данных о климатическом стоке и представлении дополнительного испарения с поверхности болот в виде $(\bar{E}_g - \bar{E}) = \Delta \bar{E}_{БОЛОТ}$, представляющим собой разницу между испарением с поверхности суши при близком E_g и глубоком залегании E грунтовых вод. Установлено, что в зоне избыточного и достаточного увлажнения роль дополнительных потерь на испарение с поверхности болот невелика и в большинстве случаев находится в пределах точности расчета среднесуточных величин годового стока (см. табл.2.3). На основе изложенного выше было принято решение рассматривать уравнение водохозяйственного баланса только с учетом первых двух составляющих уравнения водохозяйственного баланса.

Уравнение водохозяйственного баланса в условиях осушения болот, положенное в основу детерминированно-стохастической модели, может быть представлено в виде

$$Y_{OC} = Y_E + \mu \Delta H_{ГР} f_{OC} + (w_E - w_{OC}) \Delta H_{ГР} f_{OC}, \quad (5.90)$$

где Y_{OC} - слой стока с водосбора, на котором проводятся мероприятия по осушению болот; Y_E - слой стока с болот в ненарушенных хозяйственной деятельностью условиях (естественный); μ - коэффициент водоотдачи почво-грунтов, который оценивается как разность между полной и наименьшей влагоемкостью, деленной на толщину рассматриваемого слоя; $\Delta H_{ГР}$ - изменение среднего уровня грунтовых вод в результате осушения, м; f_{OC} - показатель мелиорированности территории, принятый из [190]. w_E - объемная влажность торфяной залежи до осушения; w_{OC} - объемная влажность торфяной залежи после осушения.

Среднесуточная величина $\Delta H_{ГР}$ определялась в соответствии с принятыми нормами осушения для минеральных почв и

торфяников [10,88], при этом под нормой осушения понимался слой почвы, освобожденный от избытка воды и аэрированный до уровня, обеспечивающего нормальное развитие растений. Следует отметить, что нормы осушения зависят от биологических особенностей растений, водно-физических свойств почвы, фазы развития растений и времени года. Регулируются они глубиной расположения уровня грунтовых вод. Аэрированный слой почво-грунта принимают таким, чтобы корневая система растения развивалась на нормальную глубину. Нормы осушения определяются также и общей увлажненностью конкретного года. В многоводные годы ($P < 25\%$) нормы осушения на 20-30 см больше, чем в средние, а в засушливые ($P > 25\%$) – на 10-30 см меньше. Кроме того, нормы осушения различны в предпосевной и вегетационный период. Для болотных почв, особенно глубоководных торфяников, нормы осушения больше, чем для минеральных, характерных для Житомирского Полесья. В свою очередь, для тяжелых минеральных почв с высоким капиллярным уровнем поднятия нормы осушения устанавливают выше, чем для легких, не обладающих этими свойствами. Все эти обстоятельства должны быть учтены в расчетах по (5.90).

Как уже отмечалось, изменения подземного a , следовательно, и суммарного годового стока определяются также снижением запасов влаги в почво-грунтах $w_E - w_{OC}$. В среднем по региону Западного Полесья средняя объемная влажность болот и заболоченных территорий в естественных условиях может быть принята равной 88%, а ее характеристика после осушения и освоения болот определяется видом выращиваемой сельскохозяйственной культуры. Например, допустимая объемная влажность почвы для зерновых культур составляет 40-50%, для овощных - 70-80%, картофеля и корнеплодов – 60-70%, полевых многолетних трав – 70-80%, луговых трав – 80-90% от полной влагоемкости. По данным [190], преобладающая часть мелиорированных земель используется в сельскохозяйственном производстве, при этом на мощных и средних торфяниках многолетние травы занимают примерно 50%, а на мелких торфяниках - 63-75%, т.е. $w_E - w_{OC} = 3\%$ для большей части осушенных и освоенных болот рассматриваемой территории. На базе этой схемы создана имитационная стохастическая модель, позволяющая определять вероятностные характеристики бытового стока осушаемых водосборов.

В качестве исходных статистических параметров естественного годового стока принимались результаты пространственных обобщений, выполненные на базе уравнения водно-теплового баланса и представленные картой изолиний норм годового климатического стока (см.раздел1), а также результаты районирования статистических параметров - коэффициентов вариации, асимметрии, автокорреляции - (см.

раздел 5). При генерировании рядов естественного годового стока задавались характерные для рассматриваемого региона значения климатического стока, равные 160, 140, 120 и 100 мм. С целью учета при моделировании рядов бытового стока соответствия стока и осушительных норм по обеспеченности, использовались группировки маловодных (обеспеченность стока $P > 75\%$), многоводных ($P < 25\%$) и средних по водности ($25 \leq P \leq 75\%$) лет.

Уравнение водохозяйственного баланса (5.90) было представлено в вероятностной (стохастической) форме

$$Y_{OC,P} = Y_{E,P} + \mu \Delta H_{ГР,P} f_{OC} + (w_E - w_{OC}) \Delta H_{ГР,P} f_{OC}, \quad (5.91)$$

где индекс P - обеспеченность годового стока, %.

При этом принимается, что величины Y_E и $\Delta H_{ГР}$ подчиняются одному и тому же закону распределения - трехпараметрическому гамма-распределению С.Н. Крицкого – М.Ф. Менкеля.

При постоянной динамике площадей осушаемых земель наблюдаемые ряды годового и подземного стока являются статистически неоднородными (см. рис.5.7). Другими словами, гипотеза о стационарности и эргодичности колебаний годового стока в данном случае должна быть отвергнута, а, соответственно, расчетные характеристики, определенные по исходным рядам, признаются статистически недостоверными. Однако, при допущении, что неслучайные показатели антропогенного влияния остаются неизменными во времени, моделирование бытового стока на основе уравнения (5.90) позволяет принять гипотезу о стационарности и эргодичности колебаний годового стока, но для заданного уровня водохозяйственных преобразований на водосборе, который в (5.91) определяется постоянными количественными показателями $\mu, f_{OC}, w_E - w_{OC}$. Генерирование реализаций бытового стока по (5.91) выполнялось для различных показателей мелиорированности f_{OC} (в диапазоне от 10 до 50% от общей площади водосбора) и различных сельскохозяйственных культур $w_E - w_{OC}$.

В результате получены зависимости статистических параметров бытового стока от относительных площадей осушения для различных видов сельскохозяйственных культур, которые для практического применения представлены в виде поправочных коэффициентов (коэффициентов антропогенного влияния), позволяющих осуществить переход от параметров естественного стока к параметрам бытового (5.71).

В данном случае рассматривался бытовой сток при осушении в предпосевной период, оцениваемый поправочным коэффициентом

$k_1 = f(f_{OC}, \mu)$; бытовой сток при осушении в вегетационный период - $k_2 = f(f_{OC}, \mu)$ и бытовой сток при изменении влажности почвы за счет осушения - $k_3 = f(f_{OC}, w_E - w_{OC})$. При наличии трех факторов антропогенного влияния совместный их учет выполняется при помощи суммирования поправочных коэффициентов (5.72).

Полученные результаты показывают, что при увеличении площадей осушения происходит увеличение среднемноголетних величин годового стока (рис.5.8), а коэффициенты вариации и асимметрии уменьшаются, причем интенсивность изменения стока усиливается по мере снижения общей водности водосбора.

Исследования по оценке влияния осушительных мелиораций на водные ресурсы западной части Украинского Полесья проводились многими авторами, но в работе О.З.Реверы [190] на основе наблюдаемых данных получены зависимости вида $k_{ИЗМ} = af_{OC} + b$ для Житомирского и Волынского Полесья, в которых коэффициент

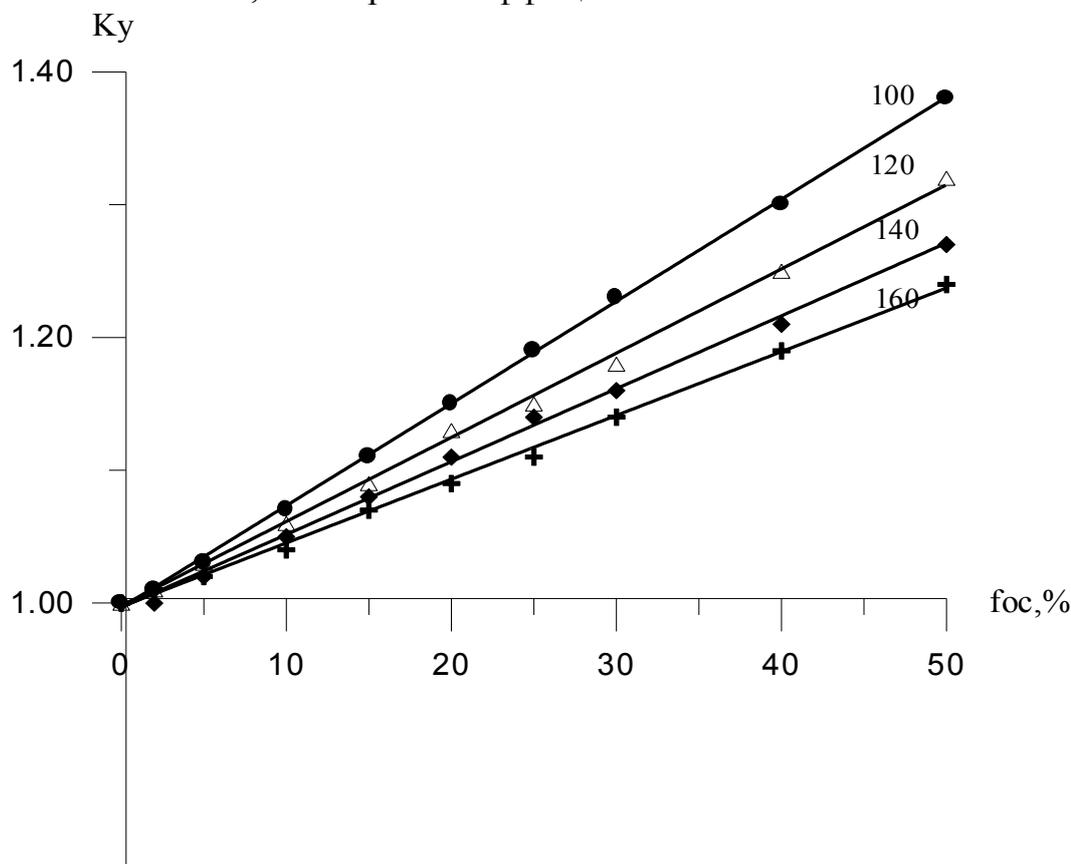


Рис. 6.8 Зависимости для определения поправочных коэффициентов к норме естественного годового стока, учитывающих влияние снижения уровня грунтовых вод при осушении болот в вегетационный период, от относительной площади мелиорированности водосборов (Житомирское Полесье) у линий - нормы климатического стока, мм

изменения стока $k_{ИЗМ}$ (5.86) по своему физическому смыслу соответствует коэффициенту антропогенного влияния $K_{\bar{Y},OC}$, полученному по результатам стохастического моделирования.

Сопоставление коэффициентов, приведенных в [190], а также полученных нами по результатам моделирования при соответствующем показателе мелиорированности f_{OC} показало удовлетворительные результаты (табл.5.5). Отклонения средних многолетних значений стока в условиях осушительных мелиораций, рассчитанных по результатам моделирования, от $k_{ИЗМ}$ находится в пределах $\pm 10\%$.

Таблица 5.5 - Сравнение результатов оценки влияния осушения на годовой сток рек по данным, приведенным в [190], и по результатам моделирования

№	Река - пункт	\bar{Y}_K , мм	f_{OC} , %	$k_{\bar{Y},OC}$	$k_{ИЗМ}$ [190]	Δk
200	р.Выжевка - пгт.Старая Выжевка	120	7	1,06	1,07	0,01
201	р.Турья - с.Ягодное	120	9	1,04	1,03	-0,01
202	р.Турья - г.Ковель	115	9	1,09	1,08	-0,01
203	р.Турья - с.Бузаки	100	15	1,15	1,15	0,00
205	р.Стоход - с.Гулевка	120	21	1,20	1,32	0,12
206	р.Стоход - пгт.Любешов	135	17	1,20	1,30	0,10
207	р.Стырь - с.Шуровцы	143	15	1,08	1,10	0,02
208	р.Стырь - г.Луцк	140	8	1,09	1,03	-0,03
211	р.Стырь - с.Млынок	125	6	1,01	0,95	-0,06
213	р.Иква - с.Радянское (Млыновцы)	150	3	0,99	1,01	0,03
215	р.Горынь - пгт.Ямполь	140	5	0,95	1,02	0,07
216	р.Горынь - с.Ожежин	140	6	1,02	1,06	0,04
217	р.Горынь - с.Деражное	145	7	1,02	1,02	0,00
220	р.Вырка - с.Сварыни	155	14	1,12	1,20	0,08
221	р.Бережанка - с. Подлесное (Рудня)	160	11	1,09	1,06	-0,03
228	р.Тня - с.Броники	92	26	1,33	1,25	-0,08
232	р.Уборть - с.Рудня Ивановская	97	24	1,24	1,34	0,10
233	р.Уборть - с.Перга	125	17	1,15	1,23	0,08
234	р.Уж - г.Коростень	97	9	1,10	1,15	0,05
235	р.Уж - пгт.Полесское	100	9	1,09	1,15	0,05
237	р.Жерев - с.Вязовка	120	6	1,08	1,05	-0,03
240	р.Грезля - с.Давыдки	110	4	1,01	1,08	0,07
243	р.Тетерев - с.Троща	110	1	1,00	1,00	0,00
244	р.Тетерев - г.Житомир	80	7	1,05	1,09	0,04
246	р.Гнилопять - с.Головинка	97	6	1,04	1,07	0,03
247	р.Гуйва - с.Городковка	100	2	1,00	1,04	0,04
251	р.Ирша - пгт. Володарск Волынский	95	2	1,00	0,98	-0,02
252	р.Ирша - с.Украинка	89	3	1,01	1,00	0,01

Преимуществом предложенной нами методики является возможность оценки влияния осушительных мелиораций не только на средний многолетний сток, но и на сток различной обеспеченности.

В заключение можно отметить, что западная часть Украинского Полесья относится к региону с переменными климатическими факторами и необходимость осушения земель в значительной степени зависит от вида сельскохозяйственных культур, которые выращиваются на осушенных болотах. Установлено, что основным фактором влияния осушения на годовой сток является сработка запасов подземных вод, которая приводит к увеличению норм суммарного годового стока в целом и снижает многолетнюю неравномерность распределения стока и асимметрию. Существенное влияние осушения наблюдается при площадях осушения больших 10%.

РАЗДЕЛ 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ УКРАИНЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

6.1. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Еще в 60-е годы XIX столетия было сделано допущение, что небольшое изменение состава атмосферы способно вызвать значительные изменения климата. Повышение концентрации двуокиси углерода может привести к явлению, называемому парниковым эффектом. Двуокись углерода пропускает солнечные лучи, нагревающие земную поверхность, одновременно удерживая значительное количество тепла, излучаемого Землей в открытый космос. Шведский ученый Аррениус рассчитал, в какой мере изменение концентрации CO_2 может оказать влияние на температуру около поверхности Земли. Удвоение концентрации CO_2 должно привести к повышению температуры на $4^\circ - 6^\circ C$. За 100 лет (с 1880 до 1989гг.) прирост CO_2 составил 20%. В настоящее время большинство климатологов придерживаются мнения, что изменения глобального климата связаны с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере [4,53,89,178,182,272,274,277,278,281]. Благодаря данным непосредственных измерений, а также анализу пузырьков воздуха из ледяных кернов было установлено, что концентрация двуокиси углерода выросла на 30%, считая с конца 18 века до 1994 года [282]. Независимые коллективы авторов, проводившие исследования в различных странах, пришли к единому выводу о том, что в течение XX века возникла тенденция к повышению средней глобальной температуры воздуха, усилившаяся в последние 15-20 лет. В отчетах IPCC [79] был получен вывод, что средняя температура воздуха повысилась на $0,3 - 0,6^\circ C$ с конца 19 века. При этом за последние 30-40 лет она выросла на $0,2 - 0,3^\circ C$, а в 80-90-е годы прошедшего столетия были одними из самых теплых, считая с 1860 года. Сравнение теоретической и эмпирической оценок изменений температуры позволяет с большой вероятностью считать, что происшедшее за этот период

потепление является следствием повышения концентрации CO_2 в атмосфере в результате деятельности человека.

Существенно больше неопределенности возникает при исследовании современных трендов осадков, из-за их значительной временной и пространственной изменчивости. Несмотря на это, получены некоторые результаты. Было установлено, что в XX веке происходил рост осадков в высоких широтах. Согласно данным [277], повышение осадков на территории бывшего СССР в среднем составило 10% за сто лет. В северной Европе (севернее 55°) наблюдается увеличение осадков с 60-х годов прошедшего столетия [278]. В Северной Америке увеличение годовых сумм осадков отмечается с начала 50-х годов [281]. В США годовые осадки за последние сорок лет в среднем выросли на 5%, а в Канаде - на 10-15%. Уменьшение осадков, особенно, начиная с середины 20-го века, наблюдается в больших тропических и субтропических регионах Северной Африки, восточной и юго-восточной Азии и Индонезии.

В перспективе рост концентрации углекислого газа будет продолжаться с интенсивностью, определяемой сценариями развития энергетики и промышленности в мире, а также мероприятиями, проводимыми в разных странах по ограничению выброса в атмосферу углекислого и других сопутствующих газов. Тем не менее, в соответствии с имеющимися прогнозами темпы роста в ближайшие десятилетия будут достаточно высокими и во второй половине текущего столетия можно ожидать удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере Земли [89].

К настоящему времени разработаны и реализуются два независимых подхода к прогнозированию климата будущего.

Первый подход, теоретический, заключается в моделировании климата с помощью соответствующих моделей общей циркуляции атмосферы. В них атмосфера рассматривается во всех трех пространственных координатах и во времени. Климатические модели постоянно совершенствуются и довольно точно воспроизводят некоторые параметры глобального климата [269]. Но эти модели основаны на общих закономерностях атмосферной циркуляции и не учитывают географические особенности территорий. Математические модели могут лишь приблизительно описать взаимодействие океанов и атмосферы, поглощение океанами двуокиси углерода и влияние облаков на обмен энергией между земной поверхностью и атмосферой. В связи с этим наблюдаются значительные расхождения в прогнозах изменения климата отдельных территорий, даже если они выполняются в рамках одного сценария. Так, например, рабочая группа РГ-1 Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [79] не смогла рекомендовать определенный сценарий возможного изменения климата, особенно по вопросам прогнозирования осадков и увлажнения почвы. В

результате были рекомендованы к рассмотрению три сценария, опирающиеся на модели атмосферной циркуляции. Первый из них (сценарий А), рассчитанный по модели GFDL (Лаборатория геофизической гидродинамики, Принстон, США) относится к наихудшей ситуации, соответствующей удвоению концентрации CO_2 в атмосфере. В общем случае математические модели глобального потепления дают разные прогнозы изменения глобальной температуры - от 1° до $5^\circ C$. Следует отметить, что понижение средней температуры в Европе на $1^\circ C$ привело к похолоданию, которое наблюдалось на протяжении нескольких столетий (с 1400 по 1800гг.) и получило название “малого ледникового периода”.

Второй подход, эмпирический, основан на анализе климатических условий прошлого. Основная идея применения палеоклиматических данных для прогнозов будущего климата заключается в том, что в прошлом Земли отыскиваются периоды, которые по концентрации CO_2 в атмосфере были близки к концентрациям, прогнозируемым на перспективу, и климатические данные этого периода используются для описания климата будущего. Например, в работе [4] показано, что оптимум голоцена (примерно 5-6 тыс. лет до нашей эры) может рассматриваться как аналог глобального потепления на $1^\circ C$. Этот эмпирический подход имеет ряд существенных недостатков. Дело в том, что климаты эпох прошлого отличаются по ряду параметров от ожидаемых климатических условий в будущем. Аналогия климатических периодов прошлого и будущего является весьма условной, так как формирование климата определяется отнюдь не только содержанием CO_2 в атмосфере.

Разработанная в Украине полуэмпирическая модель трансформации климатического поля температурного режима [24,25,53], построенная на основе суперпозиции линейного тренда и гармонического колебания с амплитудой $\approx 0.11^\circ C$ и периодом 55 лет, показала, что общее потепление формируется на фоне резко выраженной межгодовой изменчивости приземного термического режима планеты, поэтому недопустимо делать выводы о возможном изменении климатических условий только на основе метеорологической ситуации, которая наблюдалась в том или ином регионе или на протяжении непродолжительного промежутка времени.

В работах В.Ф. Мартазиновой и Т.А.Свердлика [156,157,213] рассматриваются изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции воздуха Северного полушария на протяжении XX столетия и их влияние на региональную циркуляцию и климат. Установлено, что в конце двадцатого столетия потепление на территории Украины усиливается с юга на север и превышает $1^\circ C$ в северных районах. При этом в центральных районах Украины зимой температура воздуха увеличилась на $2^\circ C$, а в южных и

западных районах страны летом отмечается снижение температуры воздуха до 1°C . Во все сезоны года наблюдается уменьшение максимальных температур и рост минимальных. Что касается осадков, то в центральной части Украины происходит увеличение годовых осадков, равномерно распределенное по сезонам и месяцам. На остальной части территории уменьшение незначительное. Изменение регионального климата поясняется изменением типа атмосферной циркуляции. Так, в начале тысячелетия (1881-1940гг.) над Украиной в зимний период преобладало действие Сибирского максимума, а с 1951 по 1980 гг. его влияние распространялось только над востоком территории, которое с 1981г. года вообще исчезло. Именно влияние Сибирского максимума обеспечивало низкие температуры воздуха и продолжительное стояние снежного покрова. Место Сибирского антициклона заняла Европейская ложбина, созданная вторым центром Исландского минимума. Действие этой ложбины смягчало климат, но и благоприятствовало вторжению холодных масс арктического воздуха и “подпитке” Сибирского максимума. С 1981года над территорией Украины преобладает субтропический максимум в результате чего зима стала теплее, а осадки наблюдаются в виде мокрого снега. В летний период над Украиной в начале тысячелетия (1881-1940гг.) преобладало влияние Азорского антициклона, которое с 1951 по 1980 гг. сменилось размытым барическим полем, в основном, циклонического характера, в результате чего наблюдались продолжительные дожди и понижение температуры воздуха. В третий период атмосферные процессы определялись узкой ложбиной, направленной на Украину с севера и погодные условия стали более изменчивыми.

По данным М.И. Барабаш и Н.П. Грибенюк [12,13], полученным на основе статистического анализа исходной информации, изменение годовой температуры за 100-летний составило для Полесья и лесостепи $0,7 - 0,9^{\circ}\text{C}$, для степи - $0,2 - 0,3^{\circ}\text{C}$. Изменение количества выпадающих осадков признано незначительным.

Учитывая вышеизложенное, полученные к настоящему времени оценки климатических условий будущего нельзя рассматривать как прогноз. Результаты этих исследований могут приниматься только в качестве возможных сценариев будущего климата. На основании результатов исследований [178,272] по оценке возможных климатических изменений в будущем, можно сделать следующие выводы.

В течение текущего столетия глобальная температура воздуха будет повышаться. Однако динамика потепления (ход во времени) остается неизвестной.

Все модели общей циркуляции атмосферы и палеоклиматические аналоги дают согласованные выводы о том, что наибольшего потепления следует ожидать в высоких широтах, особенно зимой.

Используемые независимые методические подходы дают согласованный вывод об увеличении годовых сумм осадков в высоких широтах.

Таким образом, в настоящее время концепция стационарности многолетних колебаний стока, на которой основываются методы расчета основных гидрологических характеристик, подлежит тщательному анализу в связи с происходящими изменениями климата. В работах [56,298,299] приведены результаты исследований современных изменений водного режима рек на территории России в результате глобального потепления, где отмечается, что начиная со второй половины 70-х годов прошлого столетия и по настоящее время, в бассейнах рек Волги, Дона и Днепра происходит увеличение меженного стока на 20-40% от нормы, снижение стока весеннего половодья за счет участвовавших оттепелей и увеличение годового стока. Наиболее существенное увеличение осадков наблюдается в летне-осенний период, а повышение температур - в холодный период года. Таким образом, утверждается, что существуют реальные тенденции изменений водного режима рек за счет глобального потепления уже в настоящее время.

Оценка водных ресурсов будущего может быть дана лишь на основе данных о региональных изменениях климата. При этом возможны следующие направления исследований.

* Анализ многолетних данных наблюдений за стоком и метеорологическими факторами. Этот подход позволяет установить уже происшедшие изменения, но не прогнозировать изменения водного режима в будущем.

* Использование регрессионных зависимостей между характеристиками стока и метеорологическими факторами. Прогноз возможен при условии сохранения установленных связей в будущем.

* Использование метода водного баланса. Прогноз изменения состояния водных ресурсов возможен, если тщательно отработаны методики оценок составляющих балансового уравнения.

* Применение стохастических и детерминированно-стохастических гидрологических моделей речных водосборов как системы “климат - водные ресурсы”.

Первое из рассмотренных направлений представлено в работе В.И.Вишневого [47]. Полученные им выводы по отношению к изменениям характеристик стока в результате глобального потепления можно считать условными, поскольку речь идет о бытовом (нарушенном хозяйственной деятельностью) стоке и репрезентативность исследуемых выборок нуждается в более тщательном обосновании. Так, например, по мнению М.Н. Соседко изменение водности рек Украины в настоящее время обусловлено цикличностью колебаний стока [221].

Что касается установления связей между характеристиками стока и метеорологическими факторами, то в лесостепной и степной зонах Украины эти связи не являются явно выраженными.

В стохастической модели В.А. Лобанова [284] предложен подход выделения долгопериодных климатических составляющих в конкретных рядах наблюдений и определение предикторов для их прогноза на будущее на основе авторегрессионных моделей. Недостаток модели заключается в следующем: эффективность прогноза зависит от того, насколько выделенная по наблюдаемым данным тенденция будет сохраняться в будущем.

Наиболее перспективным направлениям при решении проблемы оценки водных ресурсов в условиях изменений глобального климата является математическое моделирование. Так, в [108] использована стохастическая модель формирования стока в виде уравнения Фокера – Планка – Колмогорова (5.28), где $a(Q,t)$ - коэффициент сноса и $b(Q,t)$ - коэффициент диффузии, рассматривается в зависимости от прогнозируемых климатических воздействий – норм осадков и температуры, задаваемых сценарием ГГО (по М.И. Будыко). В качестве решения данной модели получаются различные распределения семейства кривых Пирсона III. Моделированию предшествует достаточно сложный процесс параметризации модели, т.е. определение численных значений коэффициентов, соответствующих текущему климату и уровню хозяйственной деятельности на водосборах. Согласно результатам этого моделирования, к 2000 году следовало ожидать уменьшения годового стока на 5-10%, а к 2002 году – увеличения до 15%.

Нами предложена детерминированно-стохастическая модель речного водосбора как системы “климат - водные ресурсы”, разработанная на базе метода водно-теплового баланса и динамико-стохастической модели бытового стока [64,65,66,67,68,149,238,286]. Такой подход позволяет оценивать чувствительность речных водосборов

к изменению климатических характеристик, рассчитывать характеристики стока в изменившихся климатических условиях с использованием данных любых климатических сценариев, учитывать при этом влияние водохозяйственных преобразований в пределах водосборов и, соответственно, обеспечить научно обоснованное планирование этих преобразований.

6.2. ОБОСНОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ УКРАИНЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

Надежных прогнозов глобальных, а тем более региональных изменений климата, в настоящее время не существует, поэтому для количественной оценки последствий глобального потепления, как правило, используются климатические сценарии.

Разработанные и изложенные в разделах 1 и 2 методологические подходы к оценке естественных водных ресурсов на основе метода водно-теплового баланса (с использованием метеорологической информации) открывает возможности для предварительного прогноза изменения водных ресурсов при нарушении климатических условий формирования стока, в том числе, и за счет глобального потепления. Как уже отмечалось, оценка норм климатического стока была осуществлена на базе данных до 1980 года, когда изменения климата в результате глобального потепления не были существенными. Таким образом, выполненная нами оценка ресурсов увлажнения, теплоэнергетических ресурсов климата и водных ресурсов Украины характеризует их состояние в начальных (исходных) по отношению к глобальному потеплению условиях.

При заданных сценарных изменениях климатических факторов (осадков и температур воздуха) уравнение водно-теплового баланса позволяет оценивать водные ресурсы Украины в новых климатических условиях [64,65,68,286]. При этом расчет норм климатического стока может быть осуществлен по выражению, вытекающему из (1.43)

$$\bar{Y}'_K = (\bar{X} \pm \Delta\bar{X}) - \bar{E}'_m \left[1 + \left(\frac{\bar{X} \pm \Delta\bar{X}}{\bar{E}'_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (6.1)$$

где \bar{Y}'_K - среднеголетняя величина (норма) климатического годового стока в условиях изменений регионального климата (мм);

\bar{E}_m' - среднемноголетняя величина (норма) максимально возможного испарения в условиях изменений регионального климата (мм); \bar{X} - исходная норма годовых осадков (мм); \bar{E}_m - исходная норма максимально возможного испарения (мм); $\Delta\bar{X}$ - изменения норм годовых осадков (мм).

Для определения норм максимально возможного испарения при изменении климата может быть использована эмпирическая зависимость \bar{E}_m от сумм температур летнего (май - сентябрь) сезона, представленная эмпирическим уравнением (1.47), или другими уравнениями, включающими в себя температуры за все месяцы года или его основную часть [75]. Но $\sum_V^{IX} \bar{T}_M$ должна быть откорректирована в соответствии с

прогнозом изменений температуры воздуха в приземном слое $\Delta T_M^{\circ}C$. Таким образом, для прогноза изменений водных ресурсов Украины в новых климатических условиях достаточно располагать прогнозом изменений норм годовых осадков и среднемесячных температур воздуха. Так, например, нами были использованы результаты прогнозов изменений климатических характеристик (осадков и температур воздуха) по трем альтернативным сценариям изменения климата (табл.6.1), рекомендованным 2-ой рабочей группой на Второй Всемирной Климатической конференции (Женева, 1990) [42].

Таблица 6.1- Прогноз изменений климатических характеристик (осадков и температур воздуха) по трем альтернативным сценариям , рекомендованным 2-ой рабочей группой на Второй Всемирной Климатической конференции (Женева, 1990)

Регион	Сценарии	Изменения температур, град.С		Изменения осадков, %	
		декабрь-январь-февраль	июнь-июль-август	декабрь-январь-февраль	июнь-июль-август
Запад бывшего СССР, 50 – 60° с.ш. 30 – 60° в.д.	1	6,8	3,1	30	-1
	2	4,3	5,0	20	15
	3	7,3	4,5	32	25
Южная Европа, 35 – 50° с.ш. 10 – 45° в.д.	1	4,1	4,7	12	-26
	2	4,1	4,7	17	-07
	3	4,7	5,3	-5	-31

Численные эксперименты, выполненные на основе уравнения водно-теплового баланса (1.43) за многолетний период, показали, что изменение норм климатического стока становится значимым, т.е. превышает точность

расчета данной величины, при изменении годовых осадков на $\pm 3,5\%$ или при изменении сумм среднемесячных температур за период июнь -август на $\pm 2,5^\circ C$ [286].

Предполагаемые изменения метеорологических характеристик, приведенные в альтернативных сценариях Второй Всемирной Климатической конференции [300], превышают указанные пределы и, следовательно, изменения водных ресурсов Украины при развитии событий по этим сценариям могут оказаться значимыми.

Как видно из таблицы 6.1, в альтернативных сценариях прогноз изменений температур и осадков приведен для конкретных временных интервалов: декабрь-февраль, июнь-август. В связи с этим для перехода к холодному или теплomu периоду года, или для каких-либо других расчетных периодов использовались эмпирические, большей частью аппроксимирующиеся линейными зависимостями, связи, полученные по материалам прошлых лет.

Особенность рассматриваемых сценариев состоит в том, что прогнозные данные для северной части Украины, расположенной выше 50 град. северной широты, и для остальной её территории (принадлежащей Южной Европе, согласно данным табл.6.1) существенно различаются. Наиболее ярко эта разница проявляется в прогнозах изменений осадков тёплого периода в сценарии 3, где выше 50° с.ш. осадки за июнь - август должны предположительно увеличиться на 25% , а ниже 50° с.ш. - уменьшиться на 31% .

Во избежание появления разрыва непрерывности в пространственных распределениях составляющих водно-теплового баланса величины прогнозируемых сценариями поправок и поправочных коэффициентов были вначале отнесены к центрам выделенных в сценариях территорий, а затем интерполировались в зависимости от географических координат метеостанций с использованием интерполяционных методов.

Результаты расчета по альтернативным сценариям показывают, что повышение теплоэнергетических ресурсов климата будет наблюдаться во всех трех случаях (рис.6.1). Характер изменений практически одинаков, разве что для сценария 1 в зоне достаточного увлажнения увеличение теплоэнергетических ресурсов менее выражено, чем в засушливых. Это поясняется особенностью первого сценария: для северных областей Украины прогнозируется повышение температур за временной период июнь- август на $3,1^\circ C$, а для двух других сценариев соответствующие изменения составляют $5,0$ и $4,5^\circ C$. В среднем по Украине увеличение теплоэнергетического эквивалента составит 11% . Особенно ярко индивидуальные особенности сценариев по отношению к изменению водных ресурсов проявляются при учете в воднобаласовом уравнении изменений осадков.

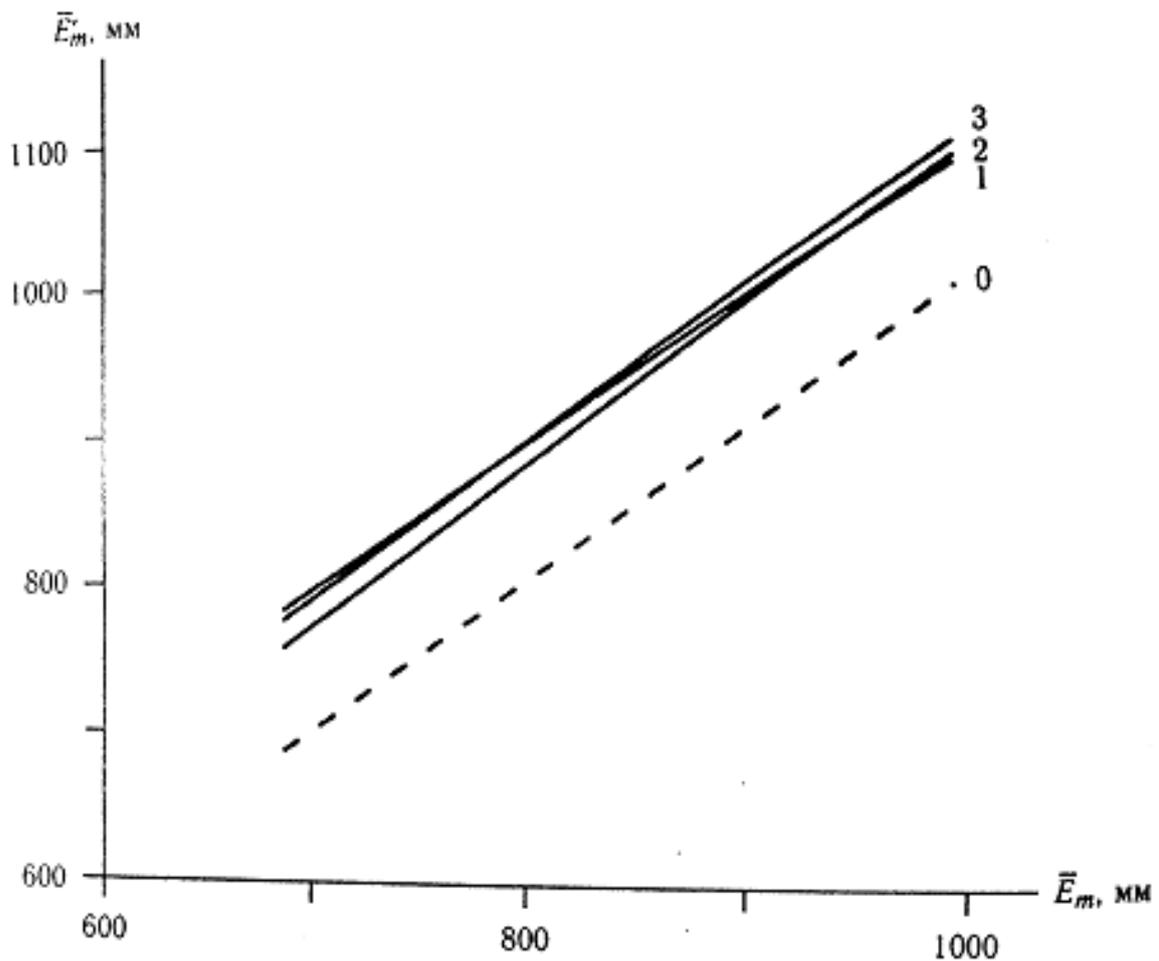


Рис. 6.1. Сравнение исходных \bar{E}_m и сценарных \bar{E}_m^* годовых норм теплоэнергетического эквивалента:

0 — линия равных значений; 1, 2, 3 — соответственно сценарии 1, 2 и 3

Так, например, сценарий 1 предполагает снижение суммарного количества норм годовых осадков в среднем до 9% (рис.6.2) . Такое сочетание климатических факторов (снижение ресурсов увлажнения и рост теплоэнергетических ресурсов) создаёт наиболее неблагоприятные для водных ресурсов условия: процесс их формирования ограничен во-первых, увлажненностью территории и, во-вторых, значительно возрастает испаряющая способность воздуха, что, в конечном итоге, приводит к повышению суммарного испарения с поверхности суши. Снижение норм климатического стока в среднем по Украине для сценария 1 составит 25% (рис. 6.3).

В сценарии 2 увеличение испарения вследствие повышения температуры воздуха компенсируется соответствующим увеличением суммы годовых осадков на 8%. В результате изменение

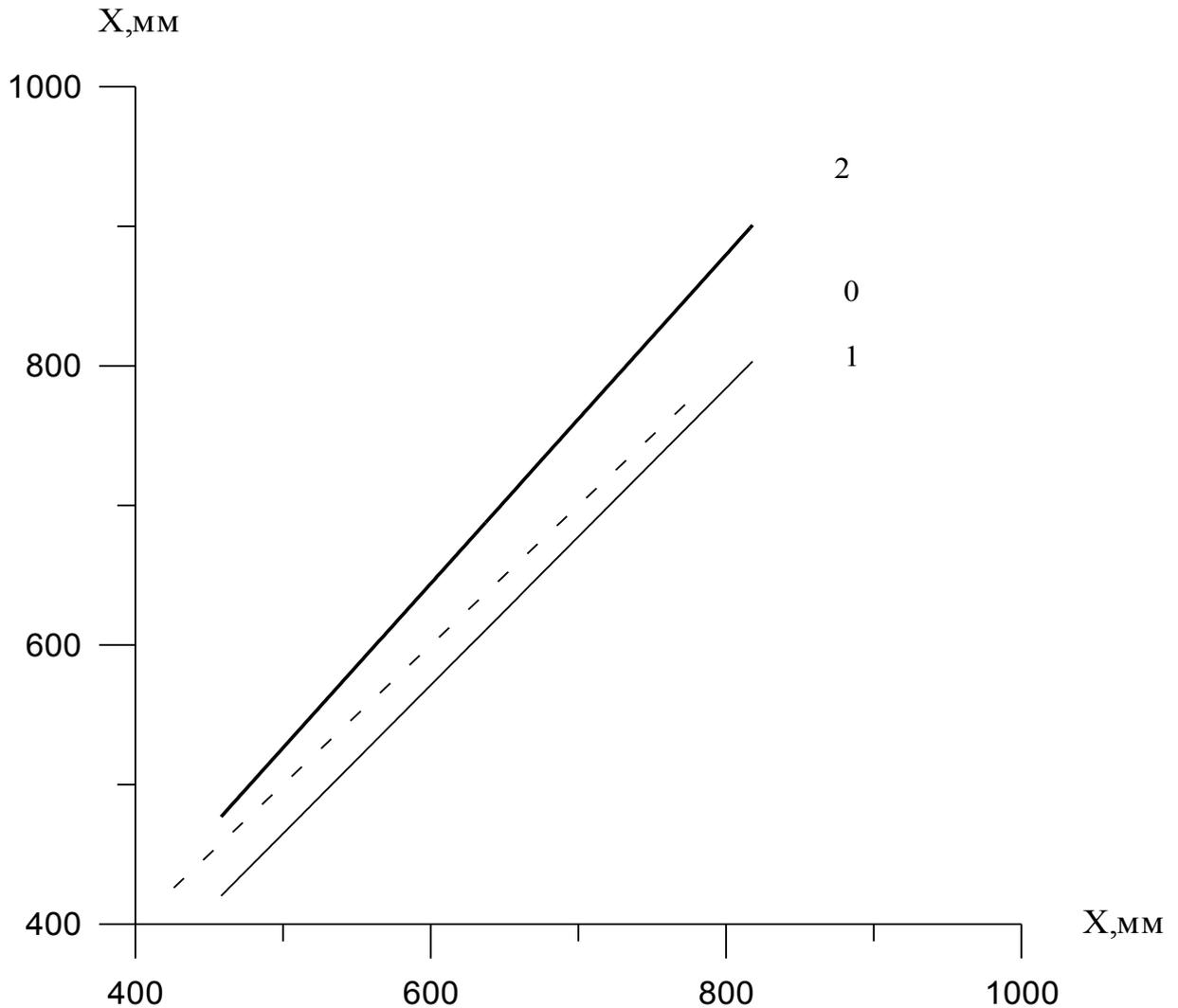


Рис. 7.2 Сравнение исходных X и сценарных X годовых норм осадков
 0 - линия равных значений;
 1,2 - соответственно сценарии 1и 2

норм климатического стока $\overline{\Delta Y_K}$ находится в пределах точности их расчёта, т.е. в пределах $\pm 10\%$. Это позволяет сделать вывод, что при развитии климатических изменений в соответствии со сценарием 2, существенных изменений водных ресурсов Украины не произойдёт.

Характерной особенностью сценария 3, как уже отмечалось, является большая разница в поправках к осадкам по широте местности. В результате градиент осадков в направлении юг - север значительно больше, чем в направлении восток - запад. В то время, когда в южных засушливых областях Украины осадки уменьшаются, по сравнению с исходной нормой, при переходе в более северные районы - их величина растёт [238,255]. Смена знака поправок соответствует изолинии норм осадков 550 мм, т.е. в результате изменений климата по сценарию 3 увлажненность территории

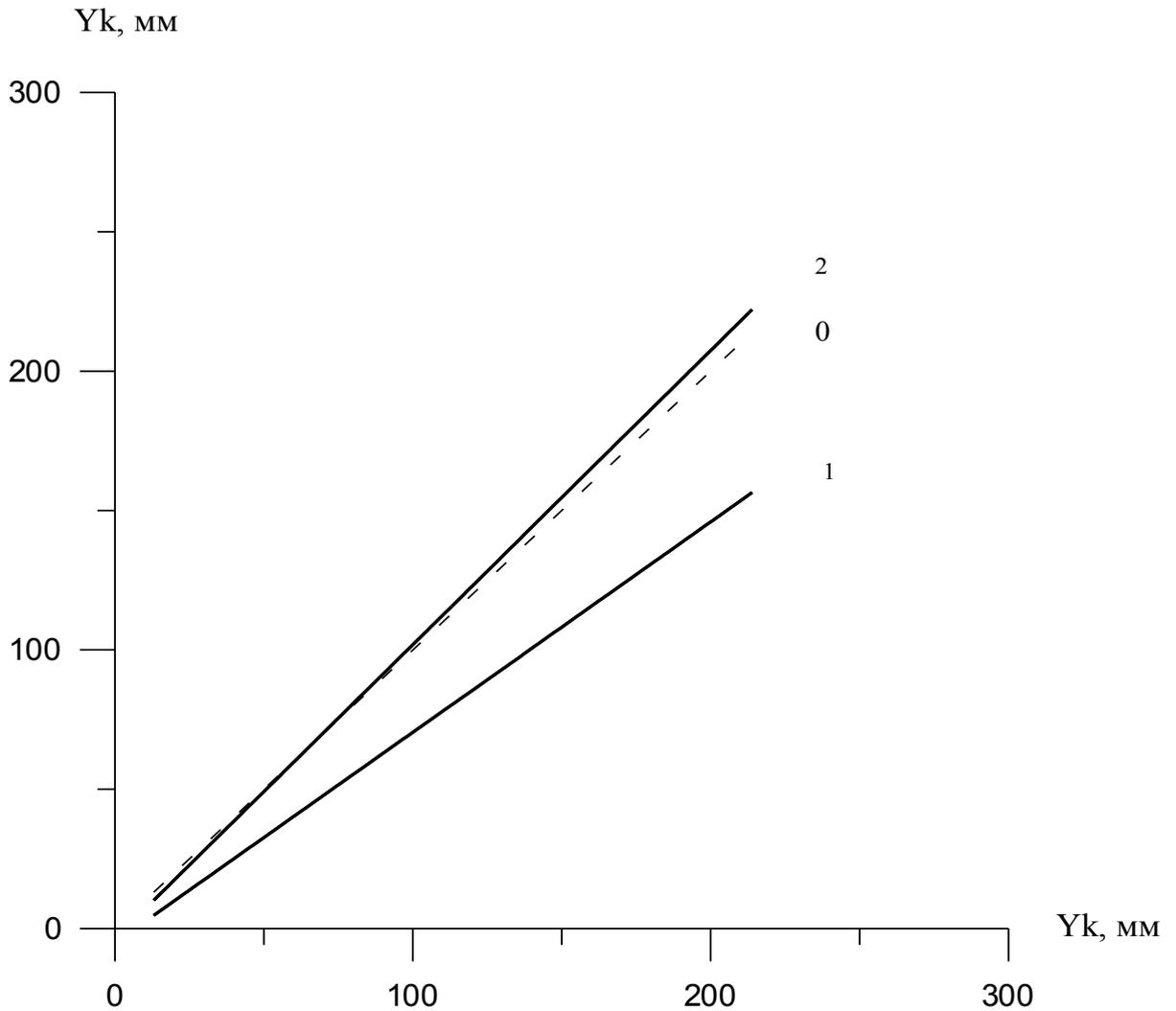


Рис.7.3 Сравнение исходных Y_k и сценарных Y_k годовых норм климатического стока
 0 - линия равных значений;
 1,2 - соответственно сценарии 1 и 2

южной степи будет уменьшаться, а в пределах Украинского Полесья - увеличиваться. В западной части Украины при тех же значениях исходных величин осадков, что и на севере, увеличения увлажненности не произойдет и, в результате, норма климатического стока будет меньше исходной.

Различия в реакции водных ресурсов на изменения климата в соответствии с разными сценариями хорошо иллюстрируются диаграммами изменения природных ресурсов (рис.6.4, рис.6.5). Согласно расчетам по сценарию 3, на большей части Украины, расположенной ниже 50° с.ш., уменьшение норм климатического стока составит в среднем 18% (рис. 6.4), а для Украинского Полесья (рис.6.5) норма климатического стока

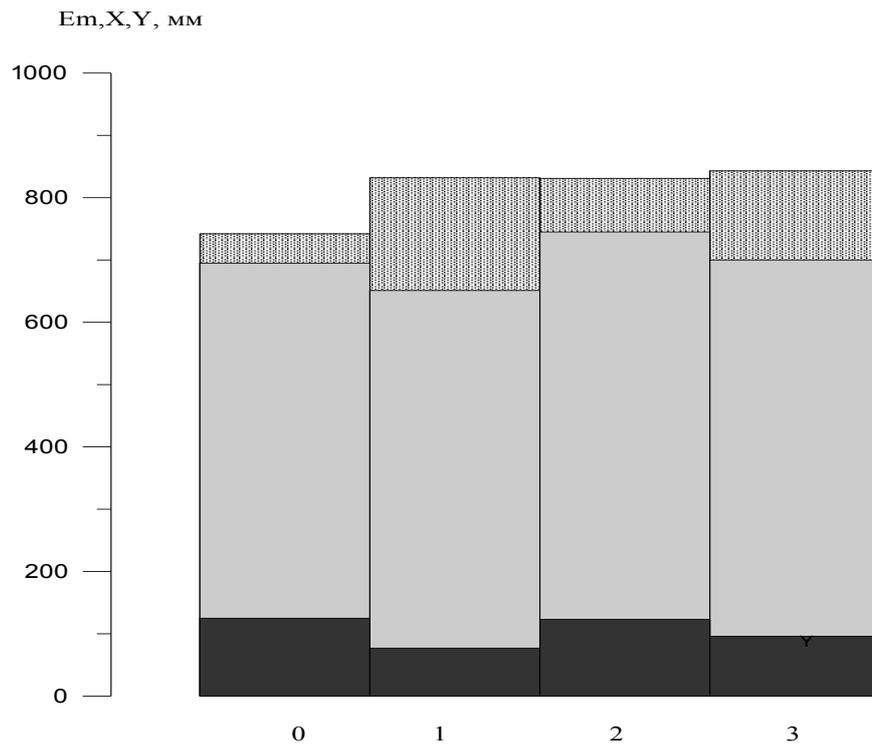


Рис. 7.4 Теплоэнергетические ресурсы E_m , ресурсы увлажнения X , водные ресурсы Y в исходных климатических условиях (0) и по данным сценариев 1,2,3 (метеостанция Тернополь)

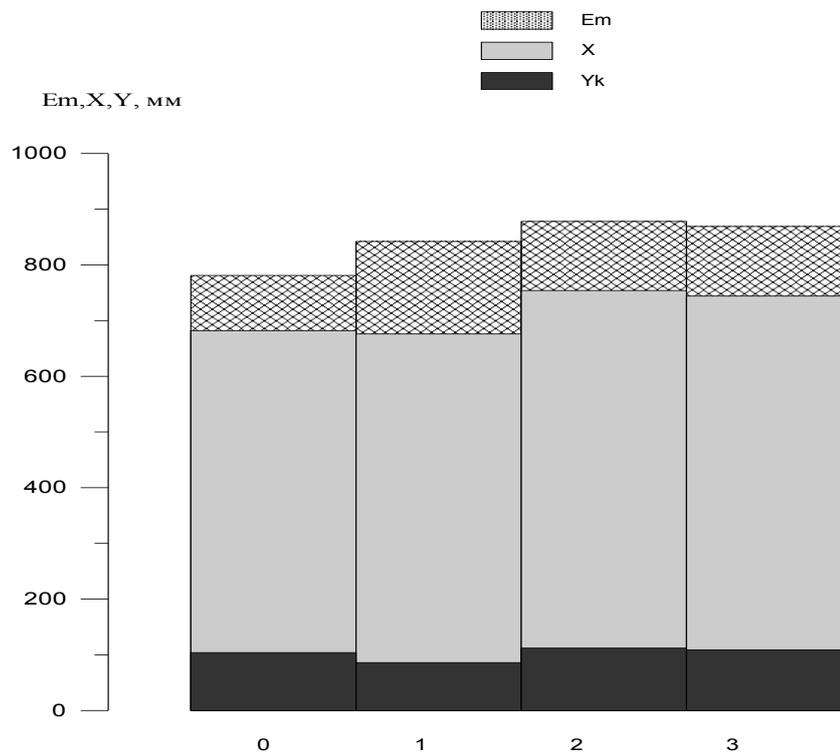


Рис. 7.5 Теплоэнергетические ресурсы E_m , ресурсы увлажнения X , водные ресурсы Y в исходных климатических условиях (0) и по данным сценариев 1,2,3 (метеостанция Ворзель)



Таблица 6.2 - Оценка воздействия глобального потепления на характеристики водных ресурсов юга Украины (сценарий 1)

Статистические характеристики годового климатического стока в исходных условиях				Статистические характеристики годового климатического стока, соответствующие сценарию 1				Уменьшение стока 75%-ной обеспеченности
Норма стока \bar{Y}_K , мм	Cv	Cs	$Y_{75\%}$, мм	Норма стока, мм	Cv	Cs	$Y_{75\%}$, мм	$\frac{\Delta \bar{Y}_K}{\bar{Y}_K} \cdot 100\%$
30,0	0,68	1,2	14,9	22,5	0,74	1,3	10,2	-31,5
20,0	0,80	1,4	8,32	15,0	1,05	1,8	3,66	-56,0
10,0	1,35	2,3	0,00	7,5	1,60	2,7	0,00	-

Примечание. - стока нет

практически не изменится. На этом основании можно сделать вывод, что наиболее неблагоприятным для Украины может быть развитие глобального потепления по сценарию 1, которое будет сопровождаться значимым снижением водных ресурсов по всей территории страны. Развитие событий по сценарию 3 также может повлиять на экономику, поскольку на основной ее части водные ресурсы уменьшатся

При этом сток северной части территории (Украинское Полесье) останется неизменным. Согласно сценарию 2 значимых изменений водных ресурсов на всей территории Украины наблюдаться не будет. Особенно следует обратить внимание на южный регион Украины, где и в настоящее время местные водные ресурсы столь ограничены, что не удовлетворяют спрос промышленности и сельского хозяйства. Соотношение ресурсов тепла и влаги $\frac{\bar{X}}{\bar{E}_m}$ в соответствии со сценариями 1 и 3 изменится от 0,85 до

0,75 на севере Молдовы и в верховьях Южного Буга и от 0,5 до 0,4 - в северо-западном Причерноморьи, что свидетельствует об усилении засушливости климата. При снижении в этом регионе норм климатического стока на 25% (сценарий 1) климатический сток маловодных лет снизится на 30-50% (табл.6.2). При этом малые реки, где $\bar{Y}_E < \bar{Y}_K$, практически исчезнут, так как уже при $\bar{Y}_K = 10$ мм сток маловодных лет достигает нулевого значения. Таким образом, можно сделать вывод, что возможные изменения глобального климата в лучшем случае не повлияют на состояние водных ресурсов Украины (сценарий 2, сценарий 3 для территории Украинского Полесья), в худшем - усугубят неблагоприятные условия их формирования, особенно в южных регионах страны.

6.3. ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГОДОВОГО СТОКА РЕК УКРАИНЫ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Если до 80-х годов прошедшего столетия под понятием “антропогенные воздействия” в гидрологии суши понимались мезомасштабные водохозяйственные мероприятия, осуществляемые внутри водосборов, то в настоящее время содержание этого понятия расширилось, включив в себя последствия наблюдающегося изменения климата [56,283,296,298,299]. В новой ситуации проблема определения расчетных характеристик бытового (нарушенного хозяйственной деятельностью) стока требует своего решения с учетом соответствующих изменений тех составляющих водохозяйственных балансов водосборов, многолетние колебания которых связаны с колебаниями климата [56,215].

Как уже отмечалось в разделе 5, оценить, а тем более спрогнозировать на будущее состояние водных ресурсов южных регионов Украины общепринятыми методами практически невозможно, поскольку сведений о стоке в естественных условиях его формирования нет, а восстановлению рядов стока методом водохозяйственного баланса препятствует отсутствие надёжных количественных данных о водопользовании. Предложенная нами детерминированно-стохастическая модель позволяет “проигрывать” в виде численных экспериментов различные водохозяйственные ситуации на водосборах и получать на выходе вероятностные характеристики годового стока (рис.6.6) в нарушенных хозяйственной деятельностью условиях [67,238,255].

Основная идея моделирования состояния водных ресурсов в условиях изменения климата сводится к следующему: по данным об изменении метеорологических характеристик на основе уравнения водно-теплового баланса определяются нормы естественного годового стока в новых климатических условиях, далее на базе детерминированно-стохастической модели рассчитываются значения бытового стока различной обеспеченности в зависимости от вида водохозяйственных преобразований на водосборах (рис.6.7).

Однако, следует учитывать, что в уравнениях водохозяйственных балансов (5.32 –5.35) меняется не только естественный (климатический) сток, но и некоторые компоненты антропогенных составляющих, например, $E_B - X$ или M_0 . Поскольку при изменениях климата меняется и норма климатического стока, то соответственно изменятся и коэффициенты антропогенного влияния. Учет изменения слоя дополнительного испарения с водной поверхности $E_B - X$ при изменениях климатических характеристик осуществляется посредством использования выражения (5.45), т.е. посредством определения нормы климатического стока. Что касается норм орошения M_0 , то изменение



Рис. 6.6 Схема стохастического моделирования рядов бытового стока в условиях водохозяйственных преобразований

этой составляющей водохозяйственного баланса должно учитываться дополнительно [149].

Поливные нормы m_0 (см. 5.66) при увеличении (уменьшении) суммы осадков в k раз будут уменьшаться (увеличиваться) на величину $\Delta X = kX$. В свою очередь рост (снижение) температур воздуха приведет к увеличению (уменьшению) максимально возможного испарения на величину $\pm \Delta E_m$, что позволяет преобразовать (5.66) к виду

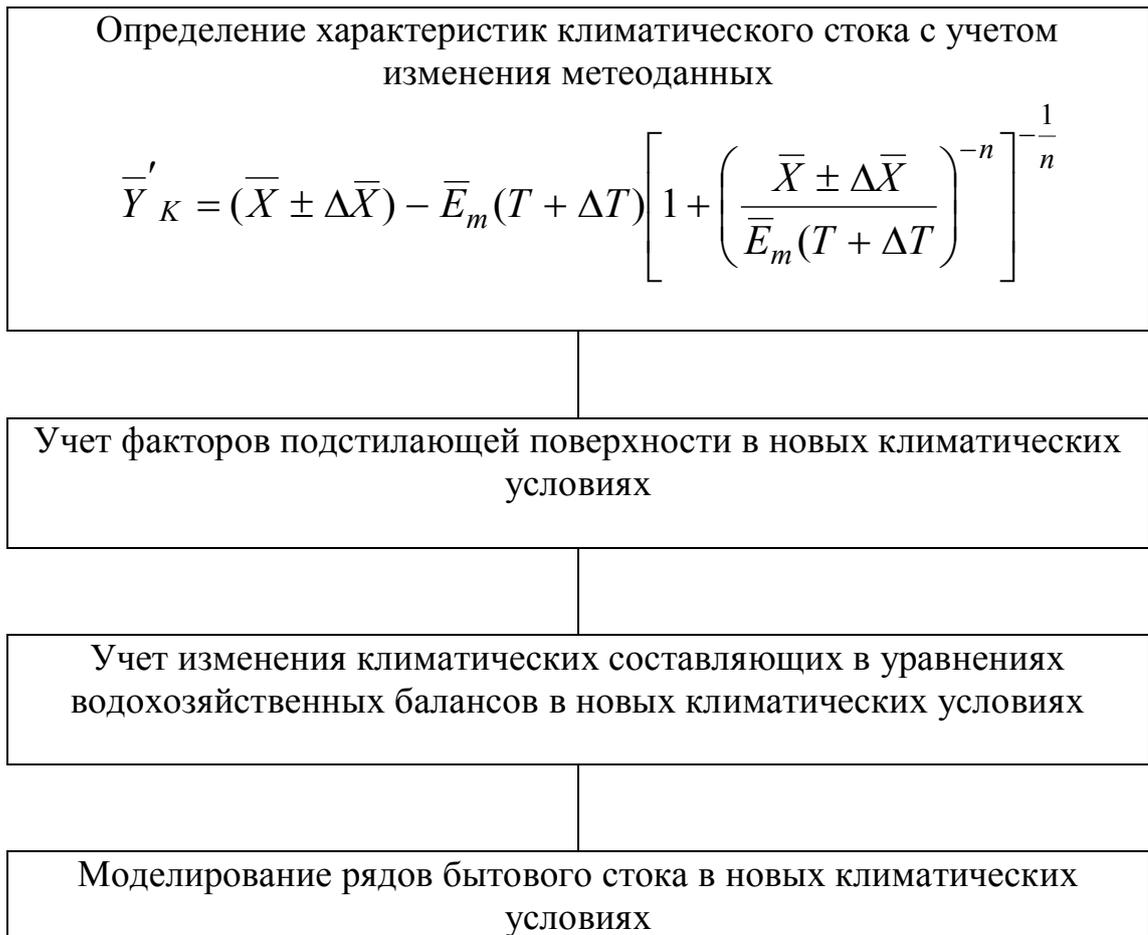


Рис. 6.7 Концептуальная схема моделирования водных ресурсов под влиянием изменений климата

$$m_0 = v_0^r (E_m \pm \Delta E_m) - (X \mp \Delta X) \quad (6.2)$$

или

$$m'_0 = m_0 \pm v_0^r \Delta E_m \mp \Delta X, \quad (6.3)$$

где m'_0 - поливная норма в новых климатических условиях; ΔE_m - изменение максимально возможного испарения; $\Delta X = kX$ - изменение осадков; k - коэффициент, характеризующий изменение осадков в долях от исходной суммы осадков расчетного периода.

В пределах северо-западного Причерноморья, где оросительные мелиорации являются основным фактором антропогенного влияния, в направлении с северо-запада на юго-восток годовые нормы осадков изменяются от 550мм до 450мм, годовые нормы максимально возможного испарения, соответственно, - от 925мм до 1000 мм. Численные эксперименты на основе (7.3) выполнялись по данным метеорологических станций, расположенных в пределах северо-западного Причерноморья.

Что касается параметров V_0 и r , то они приняты осредненными для всего региона, а, именно, - $V_0 = 0,9$ и $r = 2$. В качестве расчетного периода была взята наиболее засушливая часть вегетационного периода – с июня по август.

В результате проведения численных экспериментов на базе среднемноголетних данных установлена следующая закономерность: при увеличении (уменьшении) температуры за расчетный период на $1^\circ C$ величина E_m возрастает (снижается) в среднем на 15,5 мм, т.е. $\Delta E_m = 15,5\Delta t$. Тогда выражение (6.3) преобразуется к виду

$$m'_0 = m_0 \pm 15,5v_0^r \Delta t \pm kX \quad (6.4)$$

Допуская, что за расчетный период происходит одновременное увеличение температур воздуха и осадков, можно получить соотношения между Δt и ΔX , при которых необходимое количество поливной воды m_0 за расчетный период останется неизменным. В этом случае должно выполняться следующее условие

$$v_0^r 15,5\Delta t - \Delta X = 0, \quad (6.5)$$

или

$$v_0^r 15,5\Delta t = \Delta X \quad (6.6)$$

Из (6.6) следует, что поливная норма за период июнь - август не изменится, если увеличение осадков на величину ΔX будет сопровождаться соответствующим увеличением температур воздуха на величину Δt

$$\Delta t = \frac{\Delta X}{15,5v_0^r}, \quad (6.7)$$

или, если увеличение температур расчетного периода на Δt будет компенсироваться увеличением осадков осадков в k раз

$$k = \frac{15,5V_0^r \Delta t}{X} \quad (6.8)$$

Например, при увеличении осадков периода июнь-август на 10% (для исходных условий $V_0 = 0,9$, $r = 2$ и $X = 450$ мм) необходимо соответствующее увеличение температур на $3,5^\circ C$, чтобы количество воды, необходимой для полива, оставалось прежним.

На основе сценарных данных об изменениях метеорологических характеристик установлено, что на территории северо-западного Причерноморья ожидается следующее увеличение температуры за расчетный период - на $+4,7^\circ C$ для 1-го и 2-го сценариев, и на $5,3^\circ$ - для 3-его сценария. Для того, чтобы дефицит водопотребления воды

растениями, а, следовательно, и установленный режим оросительных мелиораций остались неизменными необходимо увеличение осадков на 15%. Согласно же данным сценариев, в северо-западном Причерноморье прогнозируется следующее изменение суммарных осадков: по первому сценарию - (-18,4%), по второму - (+0,87%) и по-третьему - (-11,0%). Таким образом, в условиях глобального потепления в северо-западном Причерноморьи увеличение температур воздуха летнего периода будет сопровождаться незначительным (в пределах 1%) увеличением осадков по сценарию 2 и уменьшением от 11 до 18% осадков по сценариям 2 и 3. Во всех случаях дефицит водопотребления воды растениями, а, следовательно, и поливная норма будут возрастать или только за счет увеличения испарения (сценарий 2), или за счет увеличения испарения и одновременного уменьшения осадков (сценарии 1 и 3). Расчет поливных норм в этом случае должен производиться по уравнению

$$m'_0 = m_0 + v'_0 \Delta E_m + \Delta X, \quad (6.9)$$

В соответствии с выражением (6.9) были рассчитаны нормы орошения для северо-западного Причерноморья с учетом новых (сценарных) климатических условий за весь вегетационный период (с мая по октябрь включительно). Установлено, что при развитии климатических изменений по сценариям 1 и 3 нормы орошения возрастут в среднем на 27-28%, а по сценарию 2 – на 18% (рис.7.8)[68].

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что возможные изменения климата усугубят достаточно сложную и в настоящее время экологическую обстановку северо-западного Причерноморья. Повышение температур воздуха летнего периода, сопровождающееся уменьшением количества выпадающих осадков, ухудшит состояние сельскохозяйственного производства, так как вновь усилится острота водных проблем, решение которых связано с переброской стока крупных рек (рр. Дунай, Днестр, Днепр). Уже сейчас необходимо проводить восстановление и реконструкцию существующих оросительных систем (Дунай-Днестровской, Белгород-Днестровской, Явкинской и др.), оптимизацию водоподачи и водораспределения в них.

Оценка изменений стока при водохозяйственных преобразованиях на водосборах была выполнена для сценария 1, поскольку последствия влияния глобального потепления именно для этого сценария наиболее неблагоприятны для водных ресурсов Украины. В качестве базовых значений норм климатического стока были выбраны слои, равные 10, 20 и 30 мм (на юге Украины климатический сток не превышает 30мм). При понижении стока на 25%, согласно сценарию 1, изменятся согласно соотношению (6.1) и другие статистические параметры стока: коэффициенты вариации и асимметрии (см.табл.6.2). Вследствие возрастания многолетней изменчивости годового стока и асимметричности

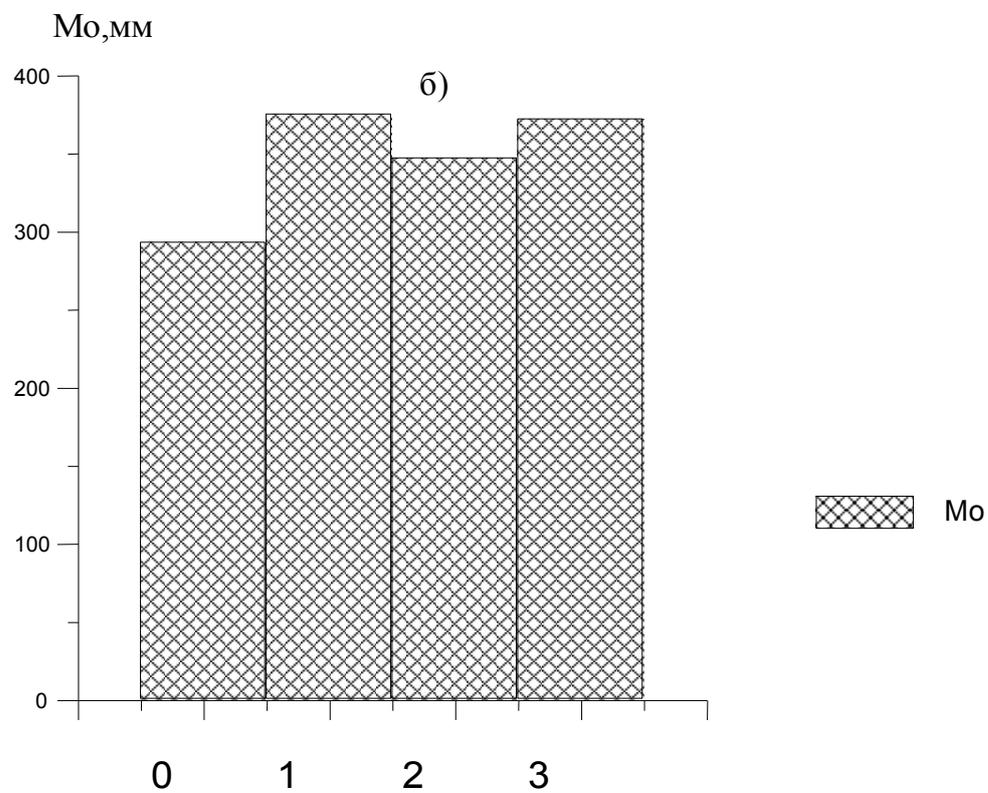
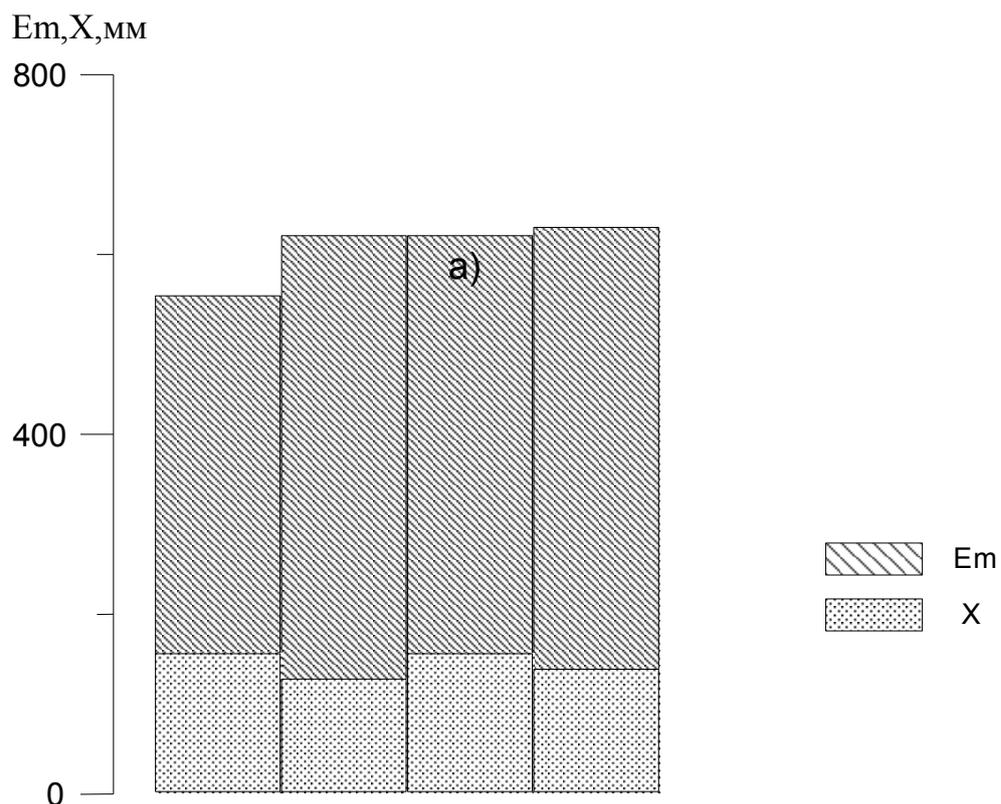


Рис.1 а) Исходные (0) и рассчитанные по сценариям (1,2,3) теплоэнергетические ресурсы E_m и ресурсы увлажнения X
 б) Исходные (0) и рассчитанные по сценариям (1,2,3) нормы орошения M_o за вегетационный период (май -октябрь)
 $V_o=0.9, r=2$ - суглинки

распределения происходит снижение стока маловодных лет. Так как в последние годы наметилась тенденция к сокращению степени воздействия водохозяйственных преобразований на водосборах, при расчётах затрат местного стока на орошение и дополнительное испарение с водной поверхности прудов и водохранилищ значения относительных площадей орошения и искусственных водоёмов, в качестве примера, приняты равными 1%.

Полученные на основе имитационной стохастической модели поправочные коэффициенты к норме климатического стока k_{OP} , k_B и коэффициент совместного влияния антропогенных факторов k_C в условиях изменения климата по сценарию 1 также существенно изменяются. Даже при малых масштабах водохозяйственных воздействий суммарное уменьшение нормы климатического стока превысит 50%.

Результаты моделирования бытового стока, представленные на рис.6.9, иллюстрируют изменение статистического распределения годового стока юга Украины в условиях глобального потепления (сценарий 1) и наличии безвозвратных потерь. Даже при относительно невысоких уровнях хозяйственного освоения территории ($f_{OP} = 1\%$, $f_B = 1\%$) и использовании засухоустойчивых культур ($v_0 = 0,9$) на территории северо-западного Причерноморья с исходной нормой климатического стока, равной 10 мм, в средние и маловодные годы сток в реках практически наблюдаться не будет [140].

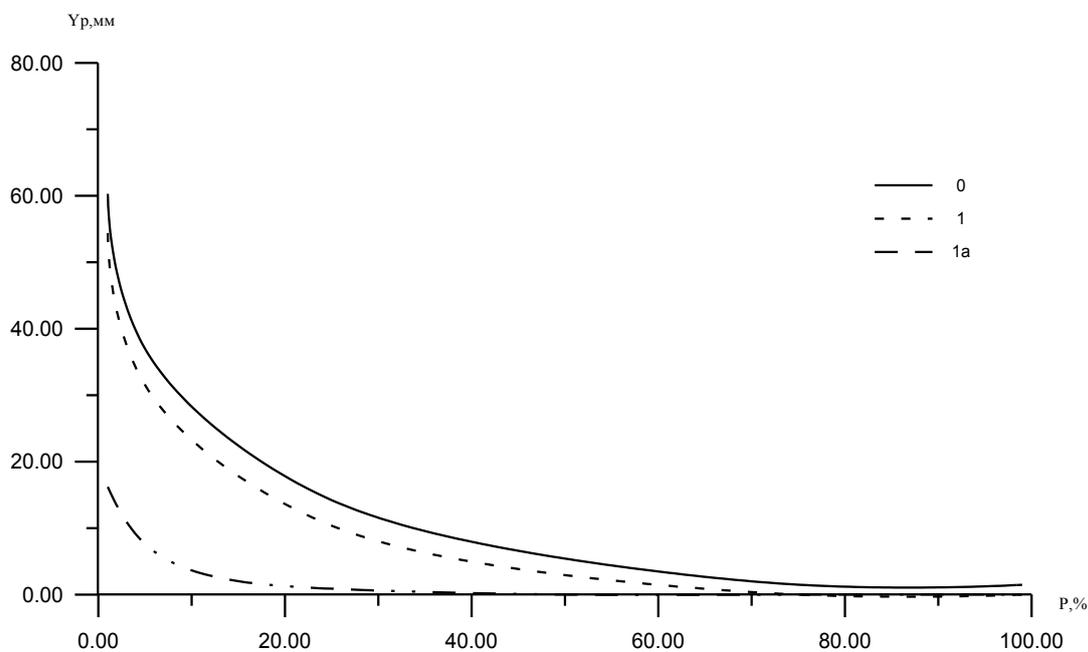


Рис.6.9 Кривые обеспеченности годового стока северо-западного Причерноморья

0 – естественный сток; 1-климатический сток в соответствии со сценарием 1; 1a – бытовой сток в условиях сценария 1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведено теоретическое обобщение и новое решение научной проблемы, которое заключается в теоретическом обосновании и разработке новых методов оценки водных ресурсов Украины в условиях антропогенного влияния, включая изменения климата, с использованием комплексного подхода, учитывающего цепь взаимодействий в системе «климат – естественный сток – водохозяйственные преобразования – бытовой сток», направленного на улучшение гидрологического обеспечения водного хозяйства Украины.

Главные научные и практические результаты работы.

1. Гидрологическая изученность поверхностных водных ресурсов Украины недостаточна для получения достоверных оценок их состояния в зависимости от масштабов антропогенных преобразований и принятия обоснованных решений по эксплуатации и управлению водохозяйственными системами. Это обусловлено недостатком данных наблюдений за стоком в естественных условиях его формирования и отсутствием систематических данных о водопотреблении. Современные обобщения годового стока отражают, прежде всего, закономерности пространственно-временного распределения бытового, нарушенного хозяйственной деятельностью стока, оставляя в виде “белых пятен” южные и юго-западные регионы Украины, где отсутствует информация по стоку как в естественных, так и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях. С целью решения поставленной проблемы разработана общая модель годового стока, предусматривающая расчет его характеристик в естественных и нарушенных антропогенными воздействиями условиях, включая изменения климата.

2. Выполнено обоснование возможности применения метода водно-теплового баланса для оценки естественных водных ресурсов Украины, при этом использованы данные по более, чем 900 метеорологическим станциям и постам. Рассчитаны и обобщены основные составляющие уравнения водно-теплового баланса – норма годовых осадков \bar{X} , как общая характеристика увлажнения

территории, и норма максимально возможного испарения \bar{E}_m , как общая характеристика ресурсов тепла.

3. Впервые для равнинной территории Украины рассчитаны и представлены в виде карты изолиний значения определенных по уравнению водно-теплового баланса норм климатического стока, как показателя естественных водных ресурсов. Среднее относительное отклонение норм климатического и естественного стока больших рек составляет $\pm 10\%$.

4. На основе данных о климатическом стоке установлены характер и количественные показатели влияния факторов подстилающей поверхности на формирование стока малых и средних рек. Выделены области отрицательных, нулевых и положительных поправок к норме климатического стока.

5. Впервые закономерности пространственно-временного распределения годового стока исследованы в связи с климатическими факторами формирования стока на структурном уровне, при помощи разложения полей рассматриваемых гидрометеорологических характеристик по естественным ортогональным функциям. Выполнена оценка вклада физических процессов различного масштаба в формирование колебаний естественного годового стока. Показано, что структура полей годового стока обусловлена структурой полей максимально возможного испарения и осадков на уровне первых трех компонент разложения, описывающих более 70% дисперсии исходных данных. Получены корреляционные зависимости между весовыми коэффициентами первых компонент разложения и климатическими факторами. Дана физическая интерпретация результатов разложения полей гидрометеорологических величин по естественным ортогональным функциям. Показано, что первые три компоненты разложения обусловлены крупномасштабными атмосферными процессами.

6. Четвертая и пятая компоненты разложения полей годового стока обусловлены процессами мезомасштаба. Установлено, что влияние естественных факторов подстилающей поверхности проявляется на уровне четвертой составляющей разложения, что нашло свое отражение в зависимостях весовых нагрузок на эту компоненту от морфометрических характеристик водосборов. Изменения характера колебаний годового стока за счет водохозяйственных преобразований на водосборах оказывают влияние на структуру полей стока лишь на уровне пятой компоненты разложения.

7. Впервые на основе установленных закономерностей в структуре полей годового стока и данных о нормах климатического стока разработана методика моделирования хронологических ря-

дов естественного годового стока неизученных рек с использованием базисных и амплитудных функций первых четырех составляющих разложения. Точность моделирования находится в пределах $\pm 15\%$.

8. Впервые для территории Украины на основе методов многомерного статистического анализа выполнено районирование по синхронности колебаний годового стока. Выделено два основных района с синфазными колебаниями годового стока, и подрайоны – с синхронными. Донбасс и Крым отнесены к регионам с существенно преобразованным характером колебаний годового стока за счет переброски стока.

9. Впервые для территории Украины выполнено теоретическое обоснование целесообразности, способа и границ географических обобщений статистических параметров годового стока на основе метода совместного анализа данных, разработанного С.Н.Крицким и М.Ф.Менкелем. Выполнено районирование статистических параметров (коэффициентов автокорреляции и отношения C_s/C_v), определяемых по наблюдаемым данным с малой степенью достоверности.

10. Выполнено обоснование новых принципов построения детерминированно-стохастических моделей годового стока в условиях водохозяйственных преобразований, базирующихся на формализме эволюционных уравнений и функции отклика с учетом стохастической природы колебаний естественного годового стока.

11. Выполнено обоснование входных параметров и вида стохастической модели колебаний годового естественного стока как простой цепи Маркова и определены ее входные параметры.

12. Разработаны и апробированы на примерах методики расчета характеристик годового стока для основных видов водохозяйственных преобразований на водосборах. В зоне недостаточного увлажнения в качестве факторов антропогенного влияния выделены заборы воды на орошение из местных водных ресурсов, потери на дополнительное испарение с водной поверхности прудов и водохранилищ, использование стока рек-доноров для орошения сельскохозяйственных земель; в зоне избыточного увлажнения – осушение болот и заболоченных территорий.

13. Установлены основные закономерности изменений статистических параметров годового стока в зависимости от показателей масштабов хозяйственного освоения водосборов. Разработана методика совместного учета различных антропогенных факторов в виде коэффициентов антропогенного влияния, которая была применена для оценки параметров бытового стока недостаточно изученных рек северо-западного Причерноморья. Адекват-

ность разработанной детерминированно-стохастической модели наблюдаемым данным устанавливалась методом сопоставления статистических параметров и вероятностных характеристик бытового стока, рассчитанных по наблюдаемым данным и по разработанным методикам с использованием независимых выборок.

14. На основе уравнения водно-теплового баланса и разработанной детерминированно-стохастической модели предложен метод оценки поверхностных водных ресурсов при изменении климатических условий формирования стока.

15. Выполнено моделирование возможных изменений поверхностных водных ресурсов в соответствии с альтернативными сценариями глобального потепления. Показано, что направления изменения водных ресурсов обусловлены режимом увлажнения, в то время как теплоэнергетические ресурсы увеличатся на 11%. В зависимости от соотношения ресурсов тепла и влаги будут изменяться и водные ресурсы. В соответствии с наиболее неблагоприятным для условий формирования стока сценарием, норма годового стока рек Украины уменьшится, в среднем, на 25%, что в сочетании с влиянием водохозяйственных мероприятий приведет к практическому исчезновению поверхностных водных ресурсов юга Украины.

Список использованных литературных источников

1. Алпатьев А.М. – Влагообороты в природе и их преобразования. – Л.:Гидрометеиздат. – 1969. – 323 с.
2. Андреев В.Г. Циклические колебания годового стока, их изменение по территории и учет при расчетах стока // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. - 1959. - т.2.- С.326-335.
3. Анискина Н.А. Исследование зависимости годового стока рек СССР от атмосферной циркуляции // Труды ГГИ. - 1970.- вып.179. - С. 63-98.
4. Антропогенные изменения климата / Под ред. М.И.Будыко, Ю.И.Израэля. - Л., Гидрометеиздат, 1987.- 406с.
5. Атлас природных условий и естественных ресурсов УССР. М.: Главное управление по геодезии и картографии при Совете Министров СССР, отдел географии, - 1978. - 120с.
6. Атлас природных условий и естественных ресурсов Молдавской ССР. М.: Главное Управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, отдел географии, 1978. - 230с.
7. Атлас Одеської області. – Одеса:Хорс. – 2002. – 80с.
8. Багров Н.А. О среднем многолетнем испарении с поверхности суши. – Метеорология и гидрология. – 1953. - №10. – С.20-25.
9. Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды ЦИП.- 1959. -Вып.74. - С.133-138.
- 10.Багров Н.А., Кружилин И.П. Сельскохозяйственная мелиорация: Учебное пособие. – М.: Агропромиздат. – 1985. - 272 с.
- 11.Балабух В.О. Оцінка опадонебезпечності території України // Наук. Праці УкрНДГМІ. –2000. – Вип.248. – С.77-84.
- 12.Барабаш М.В., Грибенюк Н.П., Татарчук О.Г. Зміна клімату при глобальному потеплінні // Водне господарство України. –1998.-№3.- С.9-12.
- 13.Барабаш М.В., Грибенюк Н.П. Зміна клімату в Україні на початку ХХІ сторіччя // Тези доповідей міжнародної конференції “Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища”- Одеса. - 2002. – С. 64 -65.
- 14.Бельская Н.Н. Южные циклоны и условия их перемещения на Европейскую территорию СССР // Труды ЦИП. - 1949. - Вып.17(44). - С. 64-113.
- 15.Бершадский А.Г. Крупномасштабные фрактальные структуры в лабораторной турбулентности, океане и астрофизике // Успехи физических наук. – 1990. – Т.160. – Вып.12. – С.189-194.
- 16.Бефани А.Н. Пути генетического определения нормы стока. - Научный ежегодник ОГУ. - Одесса. - 1957. - 125 с.

- 17.Бєфани А.Н., Мельничук О.П. Расчет нормы стока временных водотоков и горных Украинских Карпат // Труды УкрНИГМИ. - Л.: Гидрометеиздат. - 1967. - вып. 69. - С. 105 -131.
- 18.Бєфани А.М. Сучасні проблеми меліоративної гідрології. – Одеса. – 1998.- 81 с.
- 19.Блохинов Е.Г. Распределение вероятностей величин речного стока.-М.: Наука, 1974.-169 с.
- 20.Блохинов Е.Г., Сарманов О.В. Гамма-корреляция и ее использование при расчетах многолетнего регулирования речного стока. // Тр.ГГИ.- Вып. 143 Л., Гидрометеиздат.-1968.- С.52-75.
- 21.Блохинов Е.Г., Сотникова Л.Ф. Об оценке параметров распределения вероятностей годового стока рек СССР. // Тр.ГГИ.-Вып. 180.-Л. Гидрометеиздат.-1970.- С. 85-113.
- 22.Богатырь Л.Ф. Распределение осадков на территории Украины при прохождении циклонов различных траекторий // Труды УкрНИГМИ. - 1957. - Вып.7. - С. 37-50.
- 23.Богатырь Л.Ф. Траектории циклонов на юге Украины // Труды Украинского Научно-Исследовательского Гидрометеорологического Института - 1957. - Вып.7.- с.15-36.
- 24.Бойченко С.Г. Волощук В.М., Дорошенко І.А. Глобальне потепління тай його наслідки на території України // Український географічний журнал. – 2000. - №3. – С. 59-68.
- 25.Бойченко С.Г. Волощук В.М., Дорошенко І.А. Напівемпірична модель трансформації кліматичного поля приземних температур повітря на території України в 20 ст.// Наукові праці УкрНДГМІ. -2001. - Вип.249. - С.5 -23.
- 26.Болгов М.В., Сарманов И.О. Построение двумерной плотности для гидрологических и гидрогеологических приложений // Водные ресурсы. – 1991. - №3.- С.24-29.
27. Болгов М.В. , Лобода Н.С., Николаевич Н.Н., Пространственное обобщение параметров внутрирядной связности рядов годового стока // Метеорология и гидрология. - 1993. - №7. - С. 83 - 91.
28. Болгов М.В., Лобода Н.С., Николаевич Н.Н. Пространственное обобщение коэффициентов автокорреляции годового стока Украины // Труды УкрНИГМИ. – 1993. - Вып. 245. - С. 22 - 29.
29. Болгов М.В. , Лобода Н.С., Николаевич Н. Н., Сарманов И.О. О свойствах выборочных оценок параметров моделей марковских процессов с линейной гамма-корреляцией смежных членов // Метеор. климат. и гидр. - 1993. - Вып. 29. - С. 110 - 122.
- 30.Боляев М.Д. Распределение осадков на Украине при различных типах синоптических процессов // Труды ГМЦ СССР. - 1969. - Вып.56. - С. 158-164.

- 31.Будаговский А.И. Основы методики расчета оросительных норм и режимов орошения // Водные ресурсы. – 1989. -№1. – С.38-48.
- 32.Будз М. Геофізичні й геохімічні процеси на осушуваних землях та їх вплив на навколишнє середовище: Зб. наук. пр. -Україна та глобальні процеси: географічний вимір. – Луцьк. Вежа, 2000. - Т.3. С. 12-16.
- 33.Будыко М.И. Испарение в естественных условиях. - Л.: Гидрометеиздат,1948. - 136 с.
- 34.Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. - Л.: Гидрометеиздат,1956. - 255 с.
- 35.Будыко М.И., Зубенок Л.И. Определение испарения с поверхности суши / Изв. АН СССР, серия геогр.,1961. №6.
- 36.Булавко А.Г. Влияние осушения болот на элементы водного баланса рек Белорусского Полесья. – Л.: Гидрометеиздат,1961. – 151 с.
- 37.Булавко А.Г. Водный баланс речных водосборов. - Л.: Гидрометеиздат,1971. – 304 с.
- 38.Булавко А.Г., Ревера О.З., Лалыкин Н.В. Тенденция антропогенных изменений ресурсов поверхностных вод Белоруссии, Украины и Молдовы. – Сборник работ по гидрологии. – Л.:Гидрометеиздат, - 1984. - №17. – с.33-43.
- 39.Бусарова О.Е., Гусев Е.М., Применение статистического моделирования для прогноза дефицита водопотребления. // Водные ресурсы. – 1998. – Т.25. - №3. – С. 279-284.
- 40.Бучинский И.Е. Климат Украины - Л.: Гидрометеиздат, 1960. - 130 с.
- 41.Бушук В.И., Бушук О.А. Прогноз развития южных циклонов // Труды ЛГМИ. - 1971. - Вып.43. - С. 42-62.
- 42.Вакалюк Ю.В., Назаров И.М. Проблемы изменения глобального климата // Метеор. и гидрол. - 1991. - №4. - С.74 - 84.
- 43.Варламова К., Гопченко Е., Лобода Н. Альтернативные кормовые культуры - ресурсы выживаемости при климатических изменениях // Материалы Второго Международного Симпозиума “Новые и нетрадиционные растения и перспективы их практического использования”. - Том 5. - Пушино: Российская академия сельскохозяйственных наук. - 1997. - С. 602 - 604.
- 44.Великанов М.А., Соколовский Д.Л. Основная климатическая характеристика среднего многолетнего коэффициента речного стока. – Изв. ГГИ. – 1928. - №21.
- 45.Великанов М.А. Гидрология суши: Учебник. - Л.: Гидрометеиздат,1964.- 403с.
- 46.Вишневський В.І. Річки і водойми України. Стан і використання. - Київ.: Віпол, 2000. - 375с.
- 47.Вишневський В.І. Зміни клімату та річкового стоку на території України та Білорусі // Наукові праці УкрНДГМІ. -2001. - Вип.249. - С.89 -105.

- 48.Вишневський В.І. Про водогосподарчий напрям у гідрології // Наукові праці УкрНДГМІ. -2001. - Вип.249. - С.121 -137.
- 49.Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеиздат,- 1990. - 365с.
- 50.Водноэнергетические расчеты методом Монте-Карло / Под ред. А.Ш.Резниковского. – М.:Энергия. – 1969. – 302 с.
- 51.Волошин И.И. Годовой сток рек северо-запада Украины и его связь с закарстованностью водосборов // Тр. Укр НИГМИ. - М.: Гидрометеиздат. - 1971. - вып. 104. - С. 127 -133.
- 52.Волошин И.И. Годовой сток рек северо-запада Украины и его связь с закарстованностью водосборов // Тр. Укр НИГМИ. - М.: Гидрометеиздат. - 1971. - вып. 104. - С. 127 -133.
- 53.Волощук В.М., Бойченко С.Г. Возможное влияние глобального потепления на динамику климатоэкологических условий Украины в 21 веке (сценарии) // Тези доповідей до міжнародної конференції “Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища”- Одеса. - 2002. – С. 15 -16.
- 54.Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек СССР. - Л.: Гидрометеиздат,1967. - 546 с.
- 55.Гаськевич В.Г. Роль грунтоутворюючих порід у формуванні перезволожених заболочених ґрунтів Малоого Полісся // Українське Полісся: вчора, сьогодні, завтра. - Луцьк: Надстир'я. - 1998. - с.57 -59.
- 56.Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л. Оценка изменений стока рек под влиянием хозяйственной деятельности и глобального потепления климата // Докл. Международного симпозиума “Расчеты речного стока”. - ЮНЕСКО. - 1997. - с.75 -81.
- 57.Глушков В.Г. Географо-гидрологический метод. – Л. : Изв. ГГИ. –1933. - №57-58. – С. 5-10.
- 58.Гопченко Е.Д., Гушля А.В. Гидрология с основами мелиорации. - Л.: Гидрометеиздат, 1988.- 303 с.
- 59.Гопченко Е.Д., Гушля А.В., Лобода Н.С. Об оценке изменений водных ресурсов под влиянием орошения // Тезисы докладов V Всесоюзного гидрологического съезда (секция гидрологического обоснования водохозяйственных мероприятий). - Л.: Гидрометеиздат,1986. - С. 118-119.
- 60.Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Применение методов статистического моделирования при оценке изменений годового стока рек под влиянием орошения // Метеорология и гидрология. – 1986. - №9. – С. 79-84.
- 61.Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Об учете влияния карста на водные ресурсы Северского Донца // Тр. УкрНИГМИ. - 1988. - Вып.228. - С.82 -89.
- 62.Гопченко Е.Д., Лобода Н.С., Нагаєва С.П. Принципи побудови математичних моделей оцінки та прогнозу зміни водних ресурсів в умовах антропогенної діяльності // Тези доповідей VI з'їзду

- Географічного товариства УРСР “Сучасні географічні проблеми Української РСР”. - Київ. - 1990. - С. 81-82.
63. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С. Стік приток нижньої течії Дністра в умовах антропогенної діяльності // Тезиси докладов міжнародного науко-практичного семінара “Еколого - економічні проблеми Дністра” - Одеса: Южний научний центр, Одеський центр науко-технічної і економічної інформації. - 1997. - С. 19.
64. Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Методичні підходи до оцінки можливих змін водних ресурсів в умовах глобального потепління (на прикладі України). // Тези доповідей Другого з'їзду гідроекологічного товариства України. - Том 2. - Київ. - 1997. - С. 195 - 196.
65. Гопченко Є., Лобода Н., Фан Ван Тинь. Просторово- часові узагальнення річного стоку України у зв'язку з кліматичними умовами // Україна та глобальні процеси: географічний вимір: Зб. наук. праць. - т.2. Луцьк “Вежа”, 2000. - с.196 -198.
66. Гопченко Є., Лобода Н. Динаміко- стохастична модель стоку зрошуваних річок Північно-Західного Причорномор'я в умовах глобального потепління // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія: Науковий збірник. -т.1. Київ “Ніка - центр”, 2000. - с.154 - 158.
67. Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Обоснование оценки водных ресурсов Днестра в естественных и преобразованных хозяйственной деятельностью условиях с учетом глобального изменения климата // Тезиси докладов Международной научно-практической конференции “ Эколого - экономические проблемы Днестра” - Одесса: Южний научний центр, Одеський центр науко-технічної і економічної інформації. - 2000. - С. 11.
68. Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Оценка возможных изменений водных ресурсов Украины в условиях глобального потепления // Гидробиологический журнал. - Киев: Институт гидробиологии НАН Украины. - Т.36, №3. - 2000. - С. 67 - 78.
69. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С. Оцінювання природних водних ресурсів України за методом водно-теплового балансу // Наук. Праці УкрНДГМІ. -2001. – Вип.249. – С.106-120.
70. Гриб Й.В., Клименко М.О., Сондак В.В. Відновна гідроекологія порушених річкових та озерних систем (гідрохімія, гідробіологія, гідрологія, управління) : Навчальний посібник. - Том.І. – 348 с.
71. Гринвальд Д.И. Турбулентность русловых потоков. _Л.: Гидрометеиздат,1974. – 166 с.
72. Грани гидрологии: Пер. с англ. / Под ред. Джона К. Родда. - Л.: Гидрометеиздат,1987.- 535с.
73. Гусев Е.М., Бусарова О.Е., Насонова О.Н. К вопросу построения стохастических моделей колебаний испарения с поверхности суши. // Водные ресурсы. – 1996. – Т.23. - №1. – С. 5-11.

74. Гусев Е.М., Бусарова О.Е., Насонова О.Н. О возможностях статистического моделирования колебаний дефицита водопотребления агроэкосистем. // Водные ресурсы. – 1997. – Т.24. - №2. – С. 148-153.
75. Гушля А.В., Мезенцев В.С. Водно-балансовые исследования. -К.: Вища школа, 1982.- 229с.
76. Давыдов Л.К. Водоносность рек СССР, ее колебания и влияние на нее физико-географических факторов. - Л.: Гидрометеиздат, 1947.- 162 с.
77. Доброумов Б.М., Устюжанин Б.С. Преобразование водных ресурсов и режима рек центра ЕТС. - Л.: Гидрометеиздат, 1980. - 221с.
78. Жук В.А., Евстигнеев В.М. Исследование синхронности колебаний годового стока отдельных регионов приемами факторного анализа: Труды ВНИИГМИ-МЦД. - М.: Гидрометиздат. С. 78-91с.
79. Заключительное заявление научно-технической сессии II Всемирной климатической конференции // Метеорология и гидрология.- 1991.-№4. -с.8-20.
80. Закорчевна Н.Б. Гідроекологічні проблеми в басейні Південного Бугу // Науковий збірник - Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. - 2000. - Київ, Ніка-центр. - т.1. - с. 184 - 188.
81. Закревський Д.В. Розвиток гідрохімії осушуваних земель в Київському Національному університеті імені Тараса Шевченка // Науковий збірник -Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія - 2000. - Київ Ніка-центр. - т.1. - с. 44 - 49.
82. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
83. Ехнич М.П., Лобода Н.С. Исследование полей мутности на основе метода главных компонент // Тези доповідей до ювілейної міжнародної конференції Одеського державного екологічного університету. - Одеса. - 2002. – С. 181 -182.
84. Иберла К. Факторный анализ: Пер. с англ. - М.: Статистика, 1980. - 397 с.
85. Иванов К.Е. Гидрология болот. - Л.: Гидрометеиздат, 1953. - 184 с.
86. Иванов С.С. Определение фрактальной размерности глобального рельефа // Океанология. – 1994. – Т.34, №1. – С.102-106.
87. Иваненко А.Г. Исследование процессов формирования и расчета дождевых паводков на основе учета полей факторов стока. – Обнинск, 1985. – 140 с.- Рус. Деп. в ВНИИГМИ МЦД 6.06.85Г, №407 ГМ – Д85 // Аннот.в ж. География, №10, 1985.
88. Ивицкий А.И. О предельных и оптимальных нормах осушения болот // Труды УкрНИГМИ. – 1963. Вып.41. - С. 23 - 41.
89. Израэль Ю.А. Исследования влияния изменения климата // Метеорология и гидрология. - 1991. - №4. - С.29-35.
90. Исследование повторяемости и продолжительности периодов различной водности на реках СССР / В.Г. Андреев, К.П. Воскресенский, Н.Я. Глущенко, Е.Ф. Панова/ Труды ГГИ. - вып.127. - 1965. - С.227-272.

91. Исследования и расчеты речного стока / Под ред. В.Д.Быкова. - М.: Изд-во МГУ, 1981. - 228 с.
92. Каган Р.Л. Осреднение метеорологических полей. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 213 с.
93. Каганер М.С., Дюкель Н.Г. Испарение с водной поверхности на территории Украины и Молдавии // Труды УкрНИГМИ. - 1966. - Вып.64. - С.155-180.
94. Каганер М.С., Дюкель Н.Г. Исследование испарения с водной поверхности на территории Украины и Молдавии // Труды УкрНИГМИ. - 1980. - Вып.175. - С.94-105.
95. Казакевич Д.И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1971. - 230 с.
96. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1968. - 377 с.
97. Карасев И.Ф., Савельева Л.Н. Разложение гидрологических полей на естественные ортогональные составляющие и расчет слоев стока весеннего половодья неизученных рек // Моделирование и прогнозы гидрологических процессов. - Л.: РГГМИ, 1992. - Вып.113. - С.76-84.
98. Картвелиашвили Н.А. Регулирование речного стока. - Л.: Гидрометеиздат, 1970. - 218 с.
99. Картвелиашвили Н.А. Стохастическая гидрология. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - 167 с.
100. Кац А.Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды. - Л.: Гидрометеиздат, 1960. - 270 с.
101. Кенделл М. Временные ряды: Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1981. - 200 с.
102. Кирилюк М.І. Водний баланс і якісний стан водних ресурсів Українських Карпат: Навчальний посібник. - Видавництво "Рута" Чернівецького національного університету. - 2001. - 246 с.
103. Климат Украины / Под ред. Г.Ф. Прихотько, А.В. Ткаченко, В.Н. Бабиченко. - Л.: Гидрометеиздат, 1967. - 413 с.
104. Климатология / О.А. Дроздов, В.А. Васильев, Н.В. Кобышева, А.Н. Раевский и др. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 568 с.
105. Ключева К.А., Покумейко Ю.М. Влияние осушительных мелиораций на годовой сток рек Белоруссии. - Метеорология и гидрология. - 1974. - №16. - С.61-69.
106. Коваленко В.В. Гидрометрическое оценивание речного стока с элементами стохастического подхода. - Л.: ЛПИ, - 1986. - 61 с.
107. Коваленко В.В. Динамические и стохастические модели гидрологического цикла. - Л.: ЛПИ, - 1988. - 34 с.
108. Коваленко В.В., Дивногорская Е.Ю., Ляховская В.Я., Прошутинская Т.О. К оценке гидрологических последствий изменения климата:

- Межведомственный сборник научных трудов. – Л.: РГГМИ, 1992. - Вып. 113. – С.3-10.
109. Козловський Б.І., Білоус Й. М., Когут Н.Є., Шевців Я.П. Про деякі результати досліджень умов формування стоку та його хімічного складу на осушуваних землях західного регіону України // Науковий збірник - Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія - 2000. - Київ Ніка-центр. - т.1.- с. 122 - 127.
 110. Константинов А.Р. Испарение в природе - Л.: Гидрометеиздат,1968. -532 с.
 111. Константинов А.П., Астахова Н.И., Левенко А.А. Методы расчета испарения с сельскохозяйственных полей. - Л.: Гидрометеиздат,1971. - 126 с.
 112. Константинов А.Р. О метеорологических основах нормирования орошения. - Обнинск: ВНИИГМИ - МЦД,1976,№6, - 44с.
 113. Константинов А.Р., Субботин А.С. Водный и тепловой режим орошаемых полей. Учебное пособие.- Л.: Ленинградский политехнический институт, 1979 - 80 с.
 114. Коротун І.М., Година С.В., Шлапак Л.В., Яцик М.І. Коріння сучасних екологічних проблем Західного Полісся та перспективи їх вирішення // Українське Полісся: вчора, сьогодні, завтра. - Луцьк: Надстир'я. - 1998. - с.167 -170.
 115. Коротун І. М., Коротун Л.К., Коротун С.І. Природні ресурси України : Навчальний посібник. - Рівне, 2000. - 192 с.
 116. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О соответствии теоретических кривых распределения вероятностей данным наблюдений по речному стоку // М. Л. АН СССР. Проблемы регулирования речного стока. - 1948. - Вып.3. - С. 3-69.
 117. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчеты многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивной связи между стоком смежных лет // Проблемы регулирования речного стока. - Изд. АН СССР, 1959. - вып. 8.- С. 5-36.
 118. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов // Тр. ГГИ. -1968.-вып.143.- С. 110-133.
 119. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О методике совместного анализа наблюдений за стоком гидрологически сходных бассейнов // Тр. ГГИ.- 1970.-вып. 180. - С. 3-29.
 120. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком.- М. Наука,1981. - 235с.
 121. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами.- М. Наука,1982. – 271 с.
 122. Кудрянь А.П. Южные циклоны: современное состояние вопроса и проблемы // Обзор ВНИИГМИ-МЦД. - 1981. - Вып.7. - 37 с.

123. Кузин П.С. Циклические колебания стока рек Северного полушария. - Л.: Гидрометеиздат, 1970. - 178 с.
124. Кузин П.С., Бабкин В.И. Географические закономерности гидрологического режима рек. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 200 с.
125. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования стока. - Л.: Гидрометеиздат, 1980. - 144 с.
126. Линслей Р.К., Колер М.А., Паулюс Д.Л. Прикладная гидрология / Под ред. А.Н. Бефани. - Л.: Гидрометеиздат, 1962. - 760 с.
127. Лалыкин Н.В., Светличный А.А., Солодкий А.Е. Влияние хозяйственной деятельности на средний многолетний сток рек Молдавии. - В кн. Изучение и использование водных ресурсов. - М.: Гидрометеиздат. - 1980. - с.31-36.
128. Лалыкин Н.В., Солодкий А.Е. Прогноз изменений годового стока рек Молдавии под влиянием орошения // Межвед. научн. сб. Украины. - Метеорология, климатология и гидрология - Одесса. - 1983. - Вып. 19. - С.9- 11.
129. Лалыкин Н.В., Катринеску В.И. Методические основы расчета водных ресурсов малых рек республики Молдова // Тези доповідей до конференції "Гідрометерологія і охорона навколишнього середовища". - Одеса. - 2002. - С. 166 -167.
130. Логинов В.Ф. Характер солнечно-атмосферных связей. - Л.: Гидрометеиздат, 1973. - 48 с.
131. Лобанов В.А., Кучеренко В.Е. Методика расчета годового стока в виде сезонных составляющих // Труды ГГИ. - Л.: Гидрометеиздат, 1992. - Вып.357. - С. 61-79.
132. Лобанов В.А., Смирнов И.А. Декомпозиция метеорологических процессов и анализ их характеристик эмпирическими методами // Межвузовский сборник. - Вопросы прогноза погоды, климата и циркуляции атмосферы. - Пермь. - 1992. - с.101-108.
133. Лобода Н.С., Николаевич Н.Н. К вопросу исследования внутрирядных связей годового стока в условиях орошения. - Деп. В УкрНИИТИ 31.03.88, №780-УК88 // Аннот. в ж. География, №9, 1988.
134. Лобода Н.С., Халед Аднан Адель. Исследование синхронности колебаний годового стока рек Приазовья и Донецкого Кряжа в условиях антропогенного влияния. - Деп. ВИНТИ, 2220- Ук93 // Аннот. в ж. География, №8, 1993.
135. Лобода Н.С. Пространственно-временные обобщения параметров естественного годового стока рек Украины // Тезисы докладов Междунар. научно- практ. конф. "Resursele funciare si acvaticice. Valorificarea superriorava si protectia lor". - Vol.II. - Chisinau (Moldova). - 1998. - P. 230-231.
136. Лобода Н.С. Применение методов многомерного статистического анализа при оценке водных ресурсов Дунай- Днестровского междуречья

- по материалам наблюдений // Межвед. научн. сб. Украины. - Метеорология, климатология и гидрология - Одесса. - 1998. - Вып. 35. - С.293-307.
137. Лобода Н.С., Фан Ван Тинь Исследования синхронности колебаний годового стока Украинского Полесья при помощи методов многомерного статистического анализа // Межвед. научн. сб. Украины. - Метеорология, климатология и гидрология - Одесса. - 1999. - Вып. 36. - С.190- 204.
138. Лобода Н.С. Применение метода главных компонент к исследованию закономерностей многолетних колебаний годового стока и его климатических факторов. // Межвед. научн. сб. Украины. - Метеорология, климатология и гидрология. - Одесса. - 1999. - Вып. 38. - С. 112- 123.
139. Лобода Н.С. Разложение полей базисного стока на естественные ортогональные составляющие и расчет грунтового стока рек западной части Украинского Полесья // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія - Одеса. - 2000. - Вип. 40. - С. 173 - 180.
140. Лобода Н.С., Гопченко Е.Д. Модели оценки и прогноза состояния водных ресурсов рек бассейна Придунайских озер в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія и гідрологія - Одеса. - 2001. – Вип. 42. - С. 50 - 62.
141. Лобода Н.С. Синхронность колебаний годового стока рек Украины // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2001. - Вип.43. - С. 250 - 256.
142. Лобода Н.С. Восстановление рядов естественного годового стока на основе разложения его полей по естественным ортогональным функциям (на примере юго-западной части Украины и Молдовы) // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія: Науковий збірник. – т.2. - Київ: Ніка-Центр, 2001. – С. 246 - 253.
143. Лобода Н.С. Оценка гидромелиоративных норм северо-западной части Украины // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2001. – Вип. 44. - С. 175 - 181.
144. Лобода Н.С., Нгуен Ле Минь. Оценка норм максимального возможного испарения для территории Крымского полуострова // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2001. – Вип. 44. - С. 181 - 186.
145. Лобода Н.С., Шаменкова О.И. Обоснование методики расчета подземного стока рек Молдовы и юго-западной Украины на базе метода главных компонент // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2001. – Вип. 44. - С. 187 - 191.

146. Лобода Н.С. Методические подходы к оценке естественных водных ресурсов горных районов на основе метеорологической информации (на примере горной части бассейна р.Днестр) // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2002. – Вип. 45. - С. 118 –124.
147. Лобода Н.С. Формализм функции памяти и мультифрактальный подход к моделированию изменений годового стока рек под влиянием факторов антропогенной деятельности // Тези доповідей до конференції “Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища”. - Одеса. - 2002. – С. 156 -157.
148. Лобода Н.С. Формализм функций памяти и мультифрактальный подход в задачах моделирования годового стока рек и его изменения под влиянием факторов антропогенной деятельности // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2002. – Вип. 45. - С. 140 -146.
149. Лобода Н.С., Гопченко Е.Д. Оценка возможных изменений режима орошения в условиях изменений климата на территории северо-западного Причерноморья // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2002. – Вип. 45. - С. 100 –106.
150. Лобода Н.С., Гопченко Е.Д. Стохастическое моделирование годового стока с учетом антропогенных факторов // Тези доповідей до міжнародної конференції “Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища”- Одеса. - 2002. – С. 164 -165.
151. Лобода Н.С., Шаменкова О.И. Обоснование стохастических моделей годового суммарного и подземного стока в условиях осушительных мелиораций (по материалам западного Полесья) // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2002. – Вип. 46. - С. 279 – 293.
152. Лобода Н.С., Ехнич М.П. Анализ стокоформирующих факторов на основе применения метода разложения полей гидрологических характеристик по естественным ортогональным функциям // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції “Динаміка наукових досліджень”. – т.9. – Дніпропетровськ – Днепродзержинск- Черкаси. – 2002. – С.19-21.
153. Лобода Н.С., Нгуен Ле Минь. Оценка норм годового стока на основе уравнения водно-теплового баланса для территории Крымского полуострова // Міжвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - Одеса. - 2003. – Вип. 47. - С. 202 –208.
154. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. Пер. с англ. М.: Мир.-1967. -144с.
155. Маккаллоу У.С., Питтс У. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной деятельности. Автоматы. – М.: ИЛ. – 1956.

156. Мартазинова В.Ф., Свердлик Т.А. Крупномасштабная атмосферная циркуляция XX столетия, её изменения и современное состояние // Тр. УкрНИГМИ. - 1999. - вып.246. - С.21-27.
157. Мартазінова В.Ф., Свердлик Т.А. Зміни великомасштабної атмосферної циркуляції повітря протягом XX ст. та її вплив на погодні умови і регіональну циркуляцію повітря в Україні // Український географічний журнал. - 2001. - № 2. - С.28-34.
158. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик.- Л.: Гидрометеиздат,1984. - 247 с.
159. Мезенцев В.С., Карнацевич И.В. Увлажненность Западно-Сибирской равнины - Л.: Гидрометеиздат,1969. - 75с.
160. Мезенцев В.С. Расчеты водного баланса: Учебное пособие. - Омск,1976.- 76с.
161. Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И. Естественные составляющие метеорологических полей. - Л.: Гидрометеиздат, 1970.- 200 с.
162. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч.1. М.: Наука, 1965. 640 с.; Ч.2. М.: Наука, 1967. 720 с.
163. Мельничук О.Н., Лалыкин Н.В., Филлипенков А.И. Искусственные водоемы Молдовы. – Кишинев: Штиинца. – 1992. – 210 с.
164. Мишустин Н.А. Влияние осушительной мелиорации на подземный сток // НТИ – Мелиорации и водное хозяйство. – Минск, Урожай, 1979.- Вып. 1. – С. 26-28.
165. Молдаванов А.И. Заиление прудов и водохранилищ в степных районах. - Л., Гидрометеиздат,1978. - 128с.
166. Молодых В.П., Ревера О.З., Серебряков О.В., Слесарь -Жабо И.О. К оценке изменения годового стока рек Украины под влиянием хозяйственной деятельности: Сб. Комплексное использование водных ресурсов. - М.: Гидрометеиздат,1977. - вып.5.- с. 70-74.
167. Мольчак Я.А. Дождевой сток зоны избыточного увлажнения Украины (исследования и расчеты). - Львов: Вища школа, 1984. -
168. Мольчак Я.О., Мігас Р.В. Річки Волині. - Луцьк: Надстир'я, 1999. - 175 с.
169. Мольчак Я.О., Масковець І.Я. Зміна водного режиму річок внаслідок осушення // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія: Науковий збірник. – т.3. - Київ: Ніка-Центр, 2002. – С. 132-134.
170. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия. - М.: Финансы и статистика. - 1982. - 120 с.
171. Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. – М.: Наука. – 1982. – 184 с.
172. Линслей Р.К., Колер М.А., Паулюс Д.Л. Прикладная гидрология / Под ред. А.Н. Бефани. – Л.: Гидрометеиздат, 1962.- 760с.

173. Новиков С.М., Гончарова Ж.С. Прогноз изменений водных ресурсов крупных рек СССР под влиянием осушительных мелиораций // Труды ГГИ.- 1978. -вып.255. - С.54-68.
174. Новосад Я.М. Районирование территории западной части Украинского Полесья по условиям формирования минимального стока малых рек // Метеор. климат. и гидр. - Одесса. - 1981. - Вып. 17. - С. 31-35.
175. Новосад Я.М. Летне - осенний минимальный и меженный сток рек западной части Украинского Полесья: Автореф. Дис...к-та геогр. наук:11.00.07 / Одесский гидрометеорологический институт. - Одесса. - 1983. - 23 с.
176. Ольдекоп В.М. Об испарении с поверхности речных бассейнов // Труды Юрьевской обсерватории. - 1911.
177. Паламарчук М.М., Загорчевна Н.Б. Водний фонд України: Довідковий посібник. – К.: Ніка-Центр, 2001. – 392с.
178. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы / Под ред. Б. Болина, Б.Р. Десса, Дж. Ягера, Р. Уоррика. - Л.: Гидрометеоздат, 1989. - 557 с.
179. Пеляшенко В.І., Савицький В.М., Шевчук І.О., Сніжко С.І., Семерик В.М. Про деякі чинники формування якості поверхневих вод басейну р. Горинь у сучасних умовах // Науковий збірник - Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. - 2000. - Київ, Ніка-центр. - т.1. - с. 116 - 118.
180. Погосян Х.П. Сезонные колебания общей циркуляции атмосферы // Труды ЦИП. - 1947. - Вып.1(28). - С. 4-89.
181. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. - Л.: Гидрометеоздат,- 1984. - 447с.
182. Предстоящие изменения климата // Под ред. М.И.Будыко,Ю.И.Израэля,М.С. Маккракена, А.Д.Хекта – Л.:Гидрометеоздат,1991. – 272 с.
183. Привальский В.Е., Панченко В.А., Асарина Е.Ю. Модели временных рядов. – Санкт- Петербург.: Гидрометеоздат,1992. – 226 с.
184. Проект технических указаний по расчету испарения с поверхности суши. - 1966.
185. Пространственно-временные колебания стока рек СССР / Под ред.А.В. Рождественского. – Л.: Гидрометеоздат,1988. – 376 с.
186. Радиационный режим территории СССР / Барашкова Е.П., Гаевский А.Л., ДьяченкоЛ.Н.,и др. - Л.:Гидрометеоздат,1961.- 528с.
187. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. - Л.: Гидрометеоздат. - 1976. - 255 с.
188. Раткович Д.Я. Гидрологические основы водообеспечения.- М.: РАН ИВП. - 1995. - 428с.

189. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна. - М.: РАН ИВП. - 1997. - 262 с.
190. Ревера О.З. Влияние осушительных мелиораций на годовой, летне-осенний и минимальный сток рек Припятского Полесья УССР // Тр. ГГИ Вопросы гидрологии болот. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – С.134-145.
191. Режимы влагообеспеченности и условия гидромелиораций степного края / Под. ред. В.С. Мезенцева. - М.: Колос, 1974. - 240с.
192. Рекомендации по расчету испарения с суши. - Л.: Гидрометеиздат, 1976. - 96с.
193. Ресурсы поверхностных вод СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1966.- т.5, ч.1:Белоруссия. – 620 с.
194. Ресурсы поверхностных вод СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1966.- т.6, вып.1:Украина и Молдавия.-884с.
195. Ресурсы поверхностных вод СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1969.- т.4, вып.3: Литва. - 507с.
196. Ресурсы поверхностных вод СССР. Среднее и Нижнее Поднепровье. - Л.: Гидрометеиздат, 1971. - т.6. - вып.2 - 655с.
197. Ресурсы поверхностных вод СССР: - Л.: - Л.: Гидрометеиздат, 1974. – т. 6, вып. 3:Украина и Молдавия. - 491 с.
198. Речной сток и географические процессы / Дружинин И.П., Коноваленко З.П., Кукушкина В.П., Харьянова Н.В. – М.: Гидрометеиздат, 1966. – 296 с.
199. Роде А.А. Вопросы водного режима почв. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 213с.
200. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1974. - 424с.
201. Рождественский А.В., Ежов А.В., Сахарюк А.В. Оценка точности гидрологических расчетов. - Л.: Гидрометеиздат, 1990. - 276 с.
202. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. – М: Мир. – 1965.
203. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л. Л.: Гидрометеиздат, 1973. - 111 с.
204. Сакали Л.И., Пахомов В.Е. Турбулентный теплообмен на территории Украины и Молдавии // Труды УкрНИГМИ. – 1963. Вып.41. - С. 23 - 45.
205. Сарманов И.О. Построение корреляции между равномерно-распределенными случайными величинами // Тр. ГГИ.-1968.-вып. 160.- С.81-89.
206. Сарманов И.О. О корреляции между функциями зависимых случайных величин, имеющих гидрологическое приложение // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. - М.: Наука, 1973.- С. 87-103.

207. Сарманов И.О. Новые формы корреляции для гидрологических приложений // Водные ресурсы. - 1975. №2. С. 18-31.
208. Сарманов И.О. Точное распределение членов ранжированного ряда и применение корреляции между ними для моделирования гидрологического ряда.// Тр.V Всесоюзн. гидрологического съезда.-Л.: Гидрометеиздат, 1989.- С.184-190.
209. Сарманов О.В. Псевдонормальная корреляция и различные ее обобщения // Доклады АН СССР.-т. 132.-1960.-№2.- С. 299-302.
210. Сарманов О.В. Исследование стационарных марковских процессов методом разложения по собственным функциям // Тр. МИАН.-1961.- С.239-261.
211. Сарманов О.В., Сарманов И.О. Основные типы корреляции, применяемые в гидрологии.-М.: Наука, 1983.-200 с.
212. Сванидзе Г.Г., Григолия Г.Л. Применение распределения Джонсона для расчета речного стока // Водные ресурсы.-1974.- №6.- С. 45-59.
213. Свєрдлик Т. Мінливість у масштабах десятиріч атмосферної циркуляції повітря північної півкулі // Україна та глобальні процеси: географічний вимір. Зб. наук. пр. - Київ - Луцьк : Вежа, 2000. - т.2. - С. 308 - 311.
214. Синайская Т.М., Швейкин Ю.В. Асинхронность стока и водные ресурсы основных рек районов орошения УССР // Труды УкрНИГМИ. - 1971. - вып. 71. - С.124 -136.
215. Сиротенко О.Д. Имитационная система климат-урожай СССР// Метеорология и гидрология. - 1991. - №4. - С.67 - 73.
216. Смирнов Н.П., Скляренко В.Л. Методы многомерного статистического анализа в гидрологических исследованиях. - Л.: Ленингр. ун-т, 1986. -192 с.
217. Соколов А.А. О зональных и интразональных факторах стока: Сб. работ по гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. - №2.- С.38-43.
218. Соколовский Д.Р. Речной сток. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 540 с.
219. Сорокин В.Г. Средний многолетний сток орошаемых районов юга Европейской территории Советского Союза // Межвед.научн.сб. Метеорология,климатология и гидрология. - Одесса.-1974. - С.121-129.
220. Соседко М.Н. Проявление цикличности в годовом и сезонном стоке р.Днестр // Труды УкрНИГМИ. - 1974. - вып. 129. - С.42 -51.
221. Соседко М.М. Можливості оцінювання водності на найближчі роки // Тези доповідей до міжнародної конференції “Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища”- Одеса. - 2002. – С. 144 -145.
222. Справочник агрогидрологических свойств почв Украинской ССР / Под ред. А.А. Мороз. - Л.: Гидрометеиздат, 1966. - 350 с.
223. Справочник по климату СССР. Украинская ССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1967. - вып.10.,ч.II. - 607 с.

224. Справочник по климату СССР. Молдавская ССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1968. - вып.11.,ч.IV. - 127 с.
225. Справочник по климату СССР. Украинская ССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1969. - вып.10.,ч.IV. - 696 с.
226. Справочник по водным ресурсам / Под ред. Б.И.Стрельца. - К.: Урожай,1987. - 304 с.
227. Стеблевец Д.П., Стеблевец П.П. Перспективи використання річкового стоку на Прип'ятському Поліссі // Українське Полісся: вчора, сьогодні, завтра. - Луцьк: Надстир'я. - 1998. - с.67 -68.
228. Сучасна географічна картографія та її місце в геоінформаційному просторі / Бочківська А., Пархоменко Г., Руденко Л., Левицький І., Разов В. // Україна та глобальні процеси: географічний вимір: Зб. наук. праць. -т.2.Луцьк "Вежа", 2000. - С.196 -198.
229. Тимченко В.М. Гидрологические процессы водохранилищ Днепровского каскада // Гидрология и гидрохимия Днестра и его водохранилищ. - К.: Наука. - 1989. - С.15 -55.
230. Тутковский П.А. К вопросу о способе образования лесса // Землеведение. М., 1899. Кн. I-II. - С. 213 - 311.
231. Тюрк Л. Баланс почвенной влаги / Под ред. Л.Р. Струзера. Пер. с франц. - Л.: Гидрометеиздат,1958.- 240с.
232. Указания для управления гидрометеорологической службы по вычислению поправок к измеренным величинам атмосферных осадков. - Л.: Гидрометеиздат,1969. - 54с.
233. Указания по расчету испарения с поверхности суши. - Л.: Гидрометеиздат,1970. - 134с.
234. Условия образования южных циклонов и их влияние на погодные условия Украины / Хохлов В.Н.: Одес. гидрометеоролог. ин-т.- Одесса,1996.- 26с. -Рус.- Деп.в ГНТБ Украины 14.05.96, №1990-Ук96.
235. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. Пер. с англ. /Дж.-О.Ким,Ч.У.Мьюллер,У.Р. Клекка и др.- Финансы и статистика, 1989, - 215с.
236. Фан Ван Тинь, Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Климатические и водные ресурсы Украинского Полесья // Межвед. научн. сб. Украины. - Метеорология, климатология и гидрология - Одесса. - 1999. - вып. 39. - С. 254 -267 .
237. Фан Ван Тинь. Групповые оценки статистических параметров годового стока рек западной части Украинского Полесья // Метеор. климат. и гидр. - Одесса. - 2000. - Вып. 40. - С. 150 -159.
238. Фан Ван Тинь, Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Водные ресурсы западной части Украинского Полесья в условиях изменений глобального климата // Межвід. наук. зб. України. - Метеорологія, кліматологія і гідрологія - Одеса. - 2000. - 41. - С. 92 - 101.

239. Федоров С.Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне Европейской части СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1977. - 264 с.
240. Физико-географическое районирование Украинской ССР/ Под ред. Попова В.Г. - К.: Киевский университет, 1968.
241. Фоменко Я.А. Методика оценки водных ресурсов Украинской и Молдавской ССР // Труды УкрНИГМИ. - М.: Гидрометеиздат. - 1986. - вып.215. - С.85-90.
242. Форстер Д. Гидродинамические флуктуации, нарушенная симметрия и корреляционные функции. – М.: Атомиздат, 1980. – 288 с.
243. Халед Аднан Адель. Годовой сток рек Приазовья и Донецкого Кряжа: Автореф. дисс. ...канд. геогр. наук. - Одесса. 1993. – 16 с.
244. Хандожко Л.А. Региональные синоптические процессы. - Л.: изд. ЛГМИ, 1988. - 104 с.
245. Харченко С.И. Тепловоднобалансовый метод расчета водного режима /осушение и орошение/ почв в нечерноземной зоне // Тр. ГГИ. - 1978. – Вып.251. – с.3-25.
246. Харченко С.И., Волков А.С. Основы методов определения режима орошения: Обзор ВНИИГМИ МЦД ,серия Гидрология суши - Обнинск, 1979 - 57с.
247. Харченко С.И. Гидрологические основы рационального использования и охраны водных ресурсов в орошаемом земледелии // Проблемы современной гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – С.101-120.
248. Хвесик М.А., Загоровська І.З., Пастушенко П.П. Водноресурсний потенціал в прогнозах розвитку і розміщення продуктивних сил // Науковий збірник - Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. - 2000. - Київ, Ніка-центр. - т.1. - с. 27 - 31.
249. Хильчевский В.К. Развитие гидрохимических и гидроэкологических исследований в Украине // Науковий збірник - Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. - 2000. - Київ, Ніка-центр. - Т.1. - с. 27 - 29.
250. Хохлов В.Н. Траектории южных циклонов // Информационный листок Одесского ЦНТЭИ. - 1997. - №05-97. - 5 с.
251. Христофоров А.В. Географические обобщения в расчетах и прогнозах речного стока // Тр. V Всесоюзн. Гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – Т. 6. – С. 443-449.
252. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд.-во МГУ. – 1993. – 168 с.
253. Шведенко Г.В., Лобода Н.С., Обухов Е.В. К вопросу оценки теоретического гидроэнергетического потенциала малых водотоков северо-западного Причерноморья (Одесская область) на основе современного климатического стока // Метеорология, климатология и гидрология. - Одесса. - 1998. – Вып. 35. - С. 338 - 350.

254. Шведенко Г.В., Лобода Н.С., Гопченко Е.Д., Обухов Е.В. Теоретический гидропотенциал малых водотоков Одесской области // Сборник научных статей Междунар. Научно- практ. конф. “Перспективные направления развития экологии, экономики, энергетики.” - Одесса, ОЦНТЭИ. - 1999. - С.395 -340.
255. Шведенко Г.В., Лобода Н.С., Гопченко Е.Д., Обухов Е.В. К вопросу оценки теоретического гидроэнергетического потенциала малых водотоков Северо-Западного Причерноморья (Одесская область) в условиях глобального потепления // Межвед. научн. сб. Украины. - Метеорология, климатология и гидрология - Одесса. - 1999. - Вып. 36. - С. 225 - 239.
256. Шебеко В.Ф. Гидрологический режим осушаемых территорий . – Минск, Урожай, 1970. – 300 с.
257. Шебеко В.Ф., Закржевский П.И., Брагилевская Э.А. Гидрологические расчеты при проектировании осушительных и осушительно-увлажнительных систем. - Л.: Гидрометеиздат, 1980. -311с.
258. Шелутко В.А. Статистические модели и методы исследования многолетних колебаний годового стока. -Л.: Гидрометеиздат, 1984.- 160 с.
259. Шелутко В.А. Численные методы в гидрологии. -Л.: Гидрометеиздат, 1991.- 238 с.
260. Шерешевский А.И., Войцехович В.А. Влияние хозяйственной деятельности на сток Днестра // Тр. УкрНИИ. - 1984. - Вып.200. - С.69 - 75.
261. Шерешевский А.И., Вишневский П.Ф. Норма и изменчивость годового стока рек Украины / Гидробиологический журнал. - 1997. - Т.3. - С. 81- 91.
262. Шерешевський А.І., Сіницька Л.К. Випаровування з водної поверхні на території України // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія: Науковий збірник. – т.3. - Київ: Ніка-Центр, 2002. – С. 65-71.
263. Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 302 с.
264. Шикломанов И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 335 с.
265. Шикломанов И.А., Линз Г. Влияние изменений климата на гидрологию и водное хозяйство // Метеорология и гидрология. - 1991. - №. 4.- С. 51- 66.
266. Шикломанов И.А., Бабкин В.И. Изменения климата и водное хозяйство // Метеорология и гидрология. - 1992. - №8.- С. 38- 43.
267. Школьный Є.П. Фізика атмосфери: підручник. - К.: Міносвіти України, 1997. - 698с.

268. Школьный Е.П., Лосва И.Д., Гончарова Л.Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: навчальний підручник. - К.: Міносвіти України, 1999. - 600 с.
269. Школьный Е.П., Серга Э.Н., Хохолькова Е.А. Математическая модель взаимосвязи климатических характеристик в отдельных регионах Украины и процессов в системе океан-атмосфера // Тези доповідей до міжнародної конференції “Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища” - Одеса. - 2002. – С. 54 -55.
270. Шляхтина И.К. Повторяемость и пути движения циклонов в районе Средиземного моря // Труды ГОИИ. - 1982. - Вып.160. - С. 97-102.
271. Bolgov M.V., Loboda N.S. Group estimate of the parameters of stochastic flow models // Extended abstracts International Conf. on Regionalization in Hydrology. Braunschwein (Germany). - 1997. - P. 13-16.
272. Budyko M.I., Israel Yu. A., MacCracren M.C., Heckt A.D. Propects for Future Climate// - A Special US/USSR Report on Climate and Climate Change. - Levis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan, 1991. - 270 p.
273. Cameron D., Kneale P., See L. An evaluation of a traditional and a neural net modelling approach to flood forecasting for an upland catchment?// Hydrological Processes. -2002.-Vol.16,N5.- P.1033-1046.
274. Climate Change 1995. The Science of Climate Change. EDS. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, Cambridge University Press N.Y., P. 572.
275. Gopchenko E., Loboda N. Methodical approaches to estimate the Danube region’s water resources // Conferece abstracts of XX - th conference of the Danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases on water management. - Bratislva (The Slovak Republic).- 2000. - P. 129.
276. Grayson R., Bluschl G. (Eds.) Seeing catchments with new eyes. Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modelling.- Cambridge: University Press.-2000.-416p.
277. Groisman P. Ya, V.V. Koknaeva, T.A. Belokrylova and T.R. Karl, 1991: Oercoming bieses of precipitation measurement: A history of the USSR experience. Bull. Am. Met. Soc., 72, 1725-1733.
278. Groisman P.Ya., Easterling D.R. Variability and trends precipitation and snowfall over the United States and Canada // Climate. - 1994. -7. P. 184-205.
279. Holmstrom.I. On a method for parametric representation of the state of the atmoshere. –Tellus. – 1963. – 15.- P.127-149.
280. Eds. Jones J.A.A., Woo M-K. Modelling the Impact of Climate Change on Hydrological Regimes // Hydrological Processes. -2002.-Vol.16,N6.- P.1137-1150.
281. Karl T.R., P.Y. Groisman, R.W. Knight and R.R. Heim, Jr.,1993: Recent variation of snow cover and snowfall in North America and their relation to precipitation and temperature variations. J. Climate,6, p. 1327 - 1344.

282. Krasovskaia I., Gottshalk L. Analysis of regional drought characteristics with empirical orthogonal functions // Coastal Kerala Ground Water Project, Government of India. Central Ground Water Board / Sida. –1987. p.163-167.
283. Krasovskaia I. Sensitivity of the stability of river flow regimes to small fluctuations in temperature // Hydrological Sciences, IAHS. – 1996. – Vol.41. – No.2. – P.587 – 597.
284. Lobanov V.A. Empirical – statistical methodology and methods for modeling and forecasting of climate variability of different temporal scales // Advances of atmospheric sciences. – 2001. – Vol. 18. – P.844-863.
285. Loboda N.S. Stochastic model of long-term annual flow fluctuations under anthropogenic influences (in Ukraine)// Special Issue “Stochastic models of hydro-logical processes and their applications to problems of environmental preservation”. ARW Series.-1998.-Vol.1.-P.110-118.
286. Loboda N.S. The assessment of present and future Ukrainian water resources on meteorological evidence // Proceedings of The Second International Conference on Climate and Water. - vol.3. - Espoo, Finland: Edita Ltd, Helsinki. - 1998. - p.1486-1494.
287. Loboda A.V., Loboda N.S., Glushkov A.V. Dynamics of interaction of atom with laser field. Photon echo and its use in the theory of neural networks // Науковий вісник Ужгородського університету. – Ужгород. – 2000. – Вип. 8. – ч.2. - С.328-331.
288. Loboda N.S. Ecological Effect of changes in Hydrosphere state: Analysis of interaction of the climatic factors and annual runoff with empirical orthogonal functions and memories matrices methods//Ecology of Siberia, the Far East and the Arctic.- 2001.-Vol.1.-P.79-83.
289. Loboda N.S. New Stochastic and Fractal Multisystems models of Non-linear Hydrological Systems and Applications to description of Hydrological processes and Environmental preservation// Ecology of Siberia, the Far East and the Arctic.-2001.-Vol.1- P.84-86.
290. Loboda N.S. Neural networks and multi-fractal modelling of non-linear complex systems // Науковий вісник Ужгородського університету. – Ужгород. – 2002. – Вип. 10. – С.119-121.
291. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature / Ed. Freeman W.H. and Co.New-York,1983. – 469 p.
292. Mark D, Aronson P. Scale – dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation, which applications in geomorphology and computer mapping // Mathem. Geology. – 1984. – Vol.16, №7. – P.671-683.
293. Neal C.F. From determinism to fractal processing, structural uncertainty, and the need for continued long-term monitoring of the environment: the case of acidification// Hydrological Processes. - 2002. – Vol.16, № 12. – P.2481-2484.

294. Nicolau J-M. Runoff generation and routing on artificial slopes in a Mediterranean-continental environment: the Teruel coalfield, Spain// Hydrological Processes. - 2002. – Vol.16, № 3. – P.359-368.
295. Nixon J.B., Dandy G.C., Simpson A.R. A genetic algorithm for optimizing off-farm irrigation scheduling// Journal of Hydroinformatics.- 2001.-Vol.3.-P.11-22.
296. Prudhomme C., Reynard N., Crooks S. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?// Hydrological Processes. - 2002. – Vol.16, № 6. – P.1135 –1142.
297. Obied, Ch., Creuten J. D. Some developments in the use of empirical orthogonal functions for mapping meteorological fields // Journal of Climate and Applied Meteorology. - 1986. - 25 (9) – P.1184-1204.
298. Shiclomanov I.A., Georgievsky V. Yu. Problems of the effect of antropogenic climate changes on hydrological parameters and water management // Proc. of the XVI Conference of Danube Countries, Kellheim, Germany. – 1992. - pp. 471 - 477.
299. Shiclomanov I.A., Shiclomanov A.I. Climate change, hydrology and water resources: assesment and adaptation problems (Russian experience) // Proceedings of The Second International Conference on Climate and Water. - vol.3. - Espoo, Finland: Edita Ltd, Hesinki. - 1998. - p.1371-1380.
300. Report of the Second International Conference on Climate and Water.- Espoo, Finland, 17-20August 1998. - 48p.
301. Yeung H. Modeling of service reservoirs //Journal of Hydroinformatics.- 2001.-Vol.3, N2.-P.165-172.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
РАЗДЕЛ 1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ УКРАИНЫ	6
1.1. Обоснование выбора расчетного балансового соотношения для расчетов годового стока по метеорологическим данным	6
1.2. Оценка теплоэнергетических ресурсов климата	18
1.3. Оценка ресурсов увлажнения	22
1.4. Оценка естественных водных ресурсов Украины по метеорологическим данным на основе уравнения водно-теплового баланса	25
1.5. Принципы построения методик расчета норм естественного годового стока в горных регионах на основе метеорологических данных	30
РАЗДЕЛ 2. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПО УЧЕТУ ФАКТОРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ УКРАИНЫ	33
2.1. Оценка норм естественного годового стока с малых и средних водосборов равнинных рек	33
2.2. Оценка норм естественного годового стока при близком залегании к поверхности грунтовых вод (на примере рек западной части Украинского Полесья)	42
РАЗДЕЛ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЯДОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ГОДОВОГО СТОКА НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ПОЛЕЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ	51
3.1. Теоретические основы метода главных компонент	51
3.2. Оценка взаимодействия полей годового стока и климатических факторов (на примере рек Молдовы и северо-западной Украины)	54
3.3. Обоснование возможности восстановления и моделирования рядов естественного годового стока по результатам разложения	63
РАЗДЕЛ 4. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОБОБЩЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОДОВОГО СТОКА РЕК УКРАИНЫ	72
4.1. Проблемы и содержание метода географо-гидрологических обобщений	72
4.2. Обоснование районирования территории Украины по синхронности колебаний годового стока	74

4.2.1. Современное состояние вопроса о районировании годового стока рек Украины по характеру его колебаний	74
4.2.2. Теоретические основы метода факторного анализа	76
4.2.3. Особенности применения метода главных компонент к районированию территории по синхронности колебаний годового стока.	79
4.2.4. Районирование территории Украины по синхронности колебаний годового стока на основе методов многомерного статистического анализа	80
4.3. Пространственное обобщение оценок статистических параметров годового стока, определяемых по наблюдаемым данным с малой достоверностью на основе метода совместного анализа исходных рядов стока	89
4.3.1. Теоретические основы метода совместного анализа	89
4.3.2. Оценка корреляционных связей между статистическими параметрами годового стока рек Украины	93
4.3.3. Пространственное обобщение параметров внутрирядной связности рядов годового стока	97
4.3.4. Пространственное обобщение коэффициентов вариации и отношения C_s/C_v рядов годового стока	103
РАЗДЕЛ 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОДОВОГО СТОКА РЕК УКРАИНЫ В УСЛОВИЯХ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ	110
5.1. Обзор методов стохастического моделирования годового стока	111
5.2. Обзор методов оценки годового стока в нарушенных хозяйственной деятельностью условиях	119
5.3. Математическое моделирование и расчеты годового стока при наличии водохозяйственных преобразований на водосборах рек зоны недостаточного увлажнения	125
5.3.1. Представление детерминированно-стохастических моделей как частного случая уравнения эволюции гидрологической системы	128
5.3.2. Обоснование стохастической модели, описывающей влияние искусственных водоемов на годовой сток	129
5.3.3. Обоснование стохастической модели, описывающей влияние оросительных мелиораций на годовой сток	132
5.3.4. Оценка характеристик годового стока в условиях хозяйственной деятельности для рек зоны недостаточного увлажнения на основе результатов стохастического моделирования	139
5.4. Математическое моделирование и расчеты годового стока при наличии водохозяйственных преобразований на водосборах рек зоны избыточного увлажнения (на примере западной части Украинского Полесья)	147

5.4.1.Обоснование режима гидромелиораций в западной части Украинского Полесья	147
5.4.2. Обзор методов количественной оценки влияния осушения болот на годовой сток рек	152
5.4.3. Обоснование математической модели, описывающей влияние осушительных мелиораций на годовой сток	158
РАЗДЕЛ 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ УКРАИНЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ	166
6.1. Обзор результатов исследований изменения глобального климата на и его влияния на водные ресурсы	166
6.2.Обоснование и реализация метода оценки возможных изменений водных ресурсов Украины в условиях изменений глобального климата	171
6.3. Оценки характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния, включая изменения климата	179
Заключение	186
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	190

ББК 26.22

Л68

УДК 556.16

Печатается по решению Ученого совета Одесского государственного экологического университета (протокол № _____ от ____ . ____ . 200 ____ .

Рецензенты:

д.г.н., проф. Светличный А.А., к.т.н., доц. Нусимович С.Г.

Лобода Н.С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния :

Монография. – Одесса: Изд-во “Астропринт”, 2005. - 208 с.

ISBN

Монографія присвячена розробці теоретичних засад оцінки поверхневих водних ресурсів України в умовах антропогенного впливу, до якого входять водногосподарські перетворення і зміни глобального клімату. Надається нове вирішення поставленої проблеми, яке міститься у створенні комплексного підходу до оцінки характеристик річного стоку річок України, де процес формування стоку та його математичне моделювання розглядається у послідовності “клімат- підстильна поверхня - природний стік – побутовий стік”. Книга призначена для наукових та практичних фахівців у області вивчення та використання водних ресурсів, а також для студентів та аспірантів гідрологічних, гідротехнічних та гідромеліоративних спеціальностей вищих учбових закладів.

Монография посвящена разработке теоретических основ методов оценки водных ресурсов Украины в условиях антропогенного влияния, которое включает в себя водохозяйственные преобразования и изменения глобального климата. Дано новое решение поставленной проблемы, заключающееся в создании комплексного подхода к оценке характеристик годового стока рек Украины, при котором процесс формирования стока и его математическое моделирование рассматривается в последовательности “климат – подстилающая поверхность - естественный сток – бытовой сток”. Книга рассчитана на научных и практических работников в области изучения и использования водных ресурсов, а также для студентов и аспирантов гидрологических, гидротехнических и гидромелиоративных специальностей высших учебных заведений.

Monograph is devoted to developing theoretical principles of Ukrainian surface water resources evaluation under conditions of anthropogenic impact, including watermanagement transformation on and global climatic change. New solving of the problem is proposed. The complex approach for definition of annual runoff characteristics is realized. Forming of flow process and it's mathematical modelling is considered in sequence “climate – underlying surface – natural runoff – lifeconditioned runoff”. The book is intended for researches and operational personnel in the area of study and use of water resources, and also for students, post graduates of hydrology, hydrotechnical and hydromelioration specialities of higher educational establishment.

ББК 26.22

ISBN

©Одесский государственный
экологический университет, 2005

Рос. мовою.
ISBN 966—8740—01—7.

Монографія присвячена розробці теоретичних засад оцінки поверхневих водних ресурсів України в умовах антропогенного впливу, до якого входять водногосподарські перетворення і зміни глобального клімату. Надається нове вирішення поставленої проблеми, яке міститься у створенні комплексного підходу до оцінки характеристик річного стоку річок України, де процес формування стоку та його математичне моделювання розглядаються у послідовності «клімат — підстильна поверхня — природний стік — побутовий стік». Книга призначена для наукових та практичних фахівців у галузі вивчення та використання водних ресурсів, а також для студентів та аспірантів гідрологічних, гідротехнічних та гідромеліоративних спеціальностей вищих навчальних закладів.

Л 1805040700—004 Без оголош.
2005

ББК 26.22
УДК 556.16

Наукове видання

ЛОБОДА Наталія Степанівна

**Розрахунок та узагальнення характеристик
річного стоку річок України
в умовах антропогенного впливу**

Монографія

Російською мовою

Зав. ред. *Т. М. Забанова*
Голов. ред. *Ж. Б. Мельниченко*
Редактор-коректор *І. А. Анциферова*
Техн. редактори *Р. М. Кучинська,*
Д. М. Островерова

Здано у виробництво 06.10.2004. Підписано до друку 25.02.2005. Формат 60×84/16. Папір офсетний. Гарнітура «Літературна». Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12,09. Тираж 300 прим. Зам. № 41.

Видавництво і друкарня «Екологія» (Свідоцтво ДК № 1873 від 20.07.2004 р.). 65045, м. Одеса, вул. Базарна, 106, к. 313. Тел.: (0482) 733-07-18, 37-07-95, 37-14-25