

12985

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
УКРАИНСКОЙ ССР
и
УКРАИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

VI КОНФЕРЕНЦИЯ ПРИДУНАЙСКИХ СТРАН
ПО ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ПРОГНОЗАМ

VI KONFERENZ DER DONAULÄNDER FÜR
HYDROLOGISCHE VORHERSAGEN

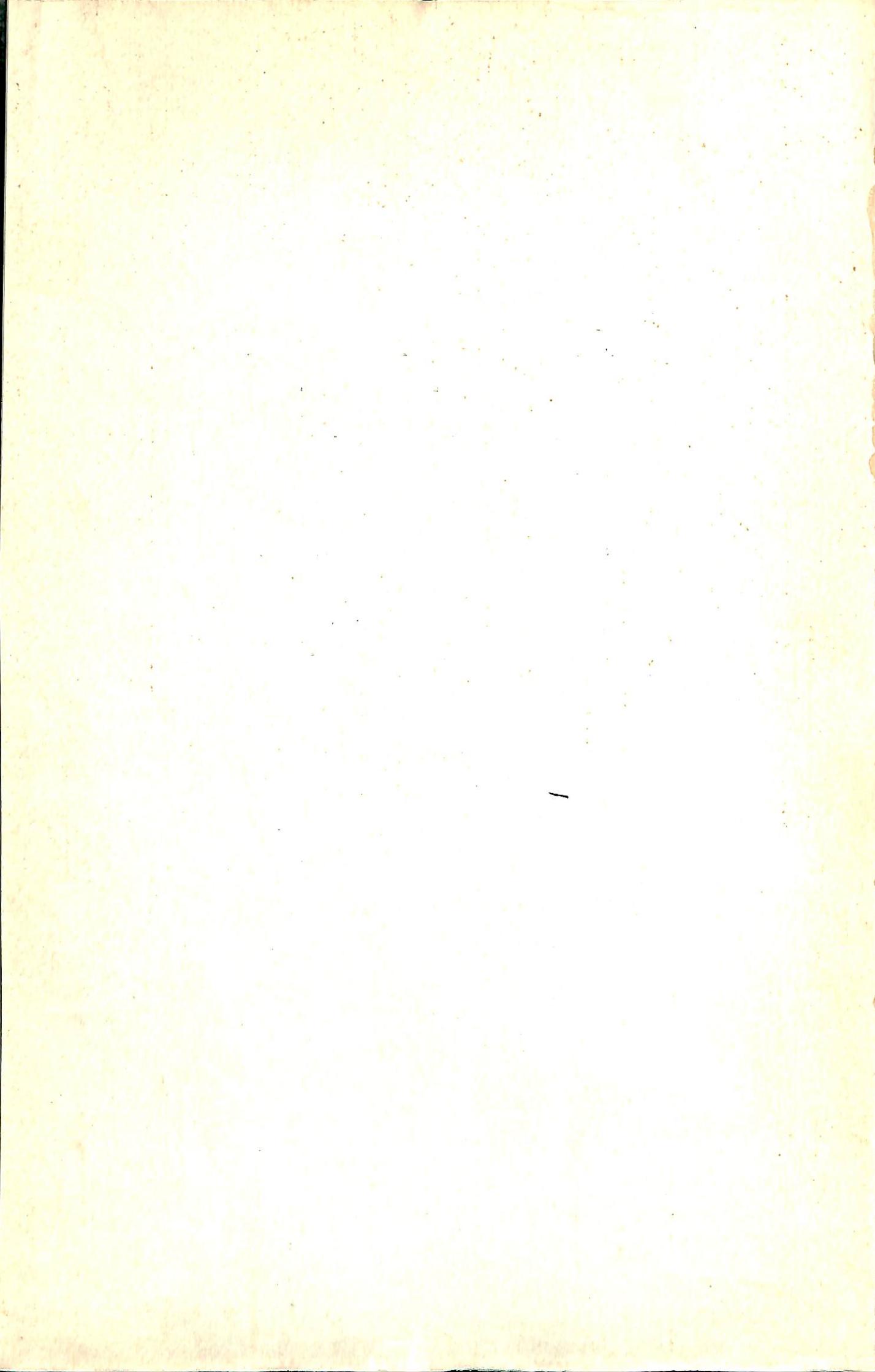
VIth CONFERENCE OF THE DANUBE COUNTRIES
ON HYDROLOGICAL FORECASTING

(14—19.VI.1971)

СБОРНИК ДОКЛАДОВ
VORTRAGSSAMMLUNG
PROCEEDINGS

Книга первая

Киев — Kiev — Kiev
1972



УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
УКРАИНСКОЙ ССР

УКРАИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

VI КОНФЕРЕНЦИЯ ПРИДУНАЙСКИХ СТРАН
ПО ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ПРОГНОЗАМ

VI KONFERENZ DER DONAULÄNDER FÜR
HYDROLOGISCHE VORHERSAGEN

VIth CONFERENCE OF THE DANUBE COUNTRIES
ON HYDROLOGICAL FORECASTING

(14—19.VI.1971)

СБОРНИК ДОКЛАДОВ
VORTRAGSSAMMLUNG
PROCEEDINGS

Книга первая

INSTITUT ZA VODOPRIVREDU
JAROSLAV ČERNÝ
BIBLIOTEKA
12.985

Киев — Kiew — Kiev
1972

РЕДАКЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

Э.ГЛАЗЛЬ	- Австрия
О.ГРУБЕР	- Австрия
Б.МАРФИНКОВ	- Болгария
А.И.АФАНАСЬЕВ	- СССР
Т.Н.МАКАРЕВИЧ	- СССР
Л.Г.Онуфриенко	- СССР
В.А.РОМАНЕНКО	- СССР

Сборник докладов VI Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам отредактирован и подготовлен к печати австрийскими (доклады на немецком языке) и советскими членами Редакционного комитета (все остальные материалы).

Общая редакция Сборника докладов выполнена Л.Г.Онуфриенко и В.А.Романенко.

Ответственный за выпуск К.Т.Логвинов.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
Предисловие	9
Речь председателя Оргкомитета Т.К.Богатыря на открытии Шестой конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам	10
Приветственная речь министра мелиорации и водного хозяйства Украинской ССР Н.А.Гаркуши . .	11
Приветственная речь заместителя председателя Межведомственного комитета СССР по МГД В.И.Корзуна	12
Приветственная речь помощника директора Секретариата и Рабочего аппарата Дунайской Комиссии С.Симеонова	13
Приветственная речь представителя Секретариата Координационного Совета по МГД ЮНЕСКО Н.А.Бочина	13
Общая заключительная дискуссия по итогам Шестой конференции	16

С П И С О К Д О К Л А Д О В :

I. ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК

Lászlóffy, W.	
NEUE AUFGABEN AUF DEM GEBIETE DER HYDROLOGISCHEN VORHERSAGEN	19
D.Andrejević, N.Coljenskić	
HYDRAULIC APPROACH TO THE SOLUTION OF SHORT-TERM FORECASTS ON THE DANUBE RIVER	25
M.Čabrić, B.Djordjević, S.Jovanović	
APPLICATION OF AN AUTOREGRESSIVE MODEL FOR FORECASTING AND SIMULATING DAILY DISCHARGE	33
Tokar, J.	
AUTOKORRELATIONSFUNKTIONEN DER ABFLÜSSE	45
Mendel, H.	
EIN NEUER VORSCHLAG ZUR BESTIMMUNG DER ABFLUSSWAHRSCHEINLICHKEIT, DARGESTELLT AM BEISPIEL DES PEGELS KEHLHEIM/DONAU	55
S.Opricović, B.Djordjević	
STOCHASTIC TREATMENT FOR FORECASTING CHANGES IN STORAGE WATER LEVEL WITH SEASONAL BALANCING	65

Н.Ф.Бефани	
ТЕРРИОРИАЛЬНО ОБЩИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАВОДЧНОГО СТОКА РЕК ВОСТОЧНЫХ КАРПАТ	69
П.Барта	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ОЦЕНКЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ	75
А.Травицки и И.Хуффа	
УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗОВ ПАВОДКОВ ПО СРЕДНЕМУ ДУНАЮ	79
О.Бонацци	
ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СТОКА ВОДЫ	87
С.Прохаска	
ОБОСНОВАНИЕ СВЕРХДОЛГОСРОЧНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЗНАЧЕНИЯ	99
Г.В.Павленко	
ФАКТОРЫ ТАЛОГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА ВЕРХНЕЙ ТИССЫ	III
В.И.Сапожников, В.В.Климова	
КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПРИТОКА В ВОДОХРАНИЛИЩЕ ГЭС НА РЕКЕ ДУНАЕ У КЕЛЕЗНЫХ ВОРОТ ПО ГИДРО- МЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ	II7
В.А.Бельчиков, В.И.Корень	
МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВОДООТДАЧИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В СТОК И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ	123
И.А.Келезняк, М.М.Ворончук, Ю.В.Швейкин	
АНАЛИЗ И УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АСИНХРОННОСТИ СТОКА И ОСАДКОВ В БАССЕЙНАХ ДУНАЯ, ДНЕСТРА И ДНЕПРА	129
С.Валиш, А.Полиненски	
РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАВОДЧНЫХ ВОЛН НА ПОЙМЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ ПРИ СЛИЯНИИ РЕК МОРАВА И ДЛЕ	137
М.И.Гуревич	
О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА БАССЕЙНОВ-ИНДИКАТОРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА МЕСЯЧНОГО СНЕГОДОЖДЕВО- ГО СТОКА Р.ДУНАЙ	145
Р.Е.Некиховский, И.П.Саковская	
ПРОГНОЗЫ СТОКА ПО ДАННЫМ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВОДЫ В РУСЛОВОЙ СЕТИ БАССЕЙНА	151

A.П.Кидиков, А.Г.Левин, Н.С.Нечаева, В.Г.Христесашвили	
ПРОГНОЗ РАСХОДОВ ВОДЫ В ЗАМЫКАЮЩЕМ СТВОРЕ РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ СЛОЖНОСТИ . . .	157
М.Балцо, Я.Становски	
ПРОГНОЗЫ РАСХОДОВ ВОДЫ В ПЕРИОД СПАДА ПОЛОВОДЬЯ ПРИ ПОМОЩИ МНОГОКРАТНОЙ ЛИНЕЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ	167
В.Думитреску, М.Якоб	
ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЛЕТНЕ-ОСЕННЕЙ МЕЖЕНЫ НА РУМЫНСКОМ УЧАСТКЕ ДУНАЯ . . .	177
Hansel,N.	
DIE BRECHNUNG DER GANGLINIE DES WANRSCHEINLICHEN HOCHWASSERS DER NÄCHSTEN X JAHRE	183
Liebscher,H.	
DIE ANWENDUNG VERSCHIEDENER METHODEN FÜR DIE BERECHNUNG DER HOCHWASSERWAHRSCHEINLICHKEIT . .	189
A.Salamin	
RUNOFF INVESTIGATION BY MEANS OF UNIT HYDROGRAPH	201
Gutknecht,D.	
PRAKТИЧЕСКИЕ ЭРФАРУНГИ МИТ ДЕР АНВЕНДУНГ ДЕС УНИТ-ХИДРОГРАФФВЕРФАРЕНС АН ЕИНЕН ОСТЕРИХИСЧЕН ДОНАУЗУБРИНГЕР	211
Rachner,M.	
ZUR BEDEUTUNG DER RÄUMLICHEN UND ZEITLICHEN VERTEILUNG DES NIEDERSCHLAGES FÜR DIE HYDROLOGISCHE VORHERSAGE	221
Schubert,H.	
HYETISCHE REGIONEN UND ABFLUSSTYPEN	227
Wiesner,G.	
HOCHWASSERGANGLINENVORHERSAGE AUS DER SCHNEEDECKE IM OBEREN SPREEGEBIET	231
Nobilis,F.	
KURZERISTIGE ABFLUSSPROGNOSEN FÜR DIE TRAUN	245
Kresser,W.	
ERFAHRUNGEN MIT DER MUSKINGUM-METHODE HINSICHTLICH IHRER ANWENDUNG AUF DIE ÖSTERREICHISCHE DONAUTRECKE	251
By.Bukovszky, G.Dely	
A GRAPHICAL ANALYTIC METHOD FOR FLOOD FORECASTING	261

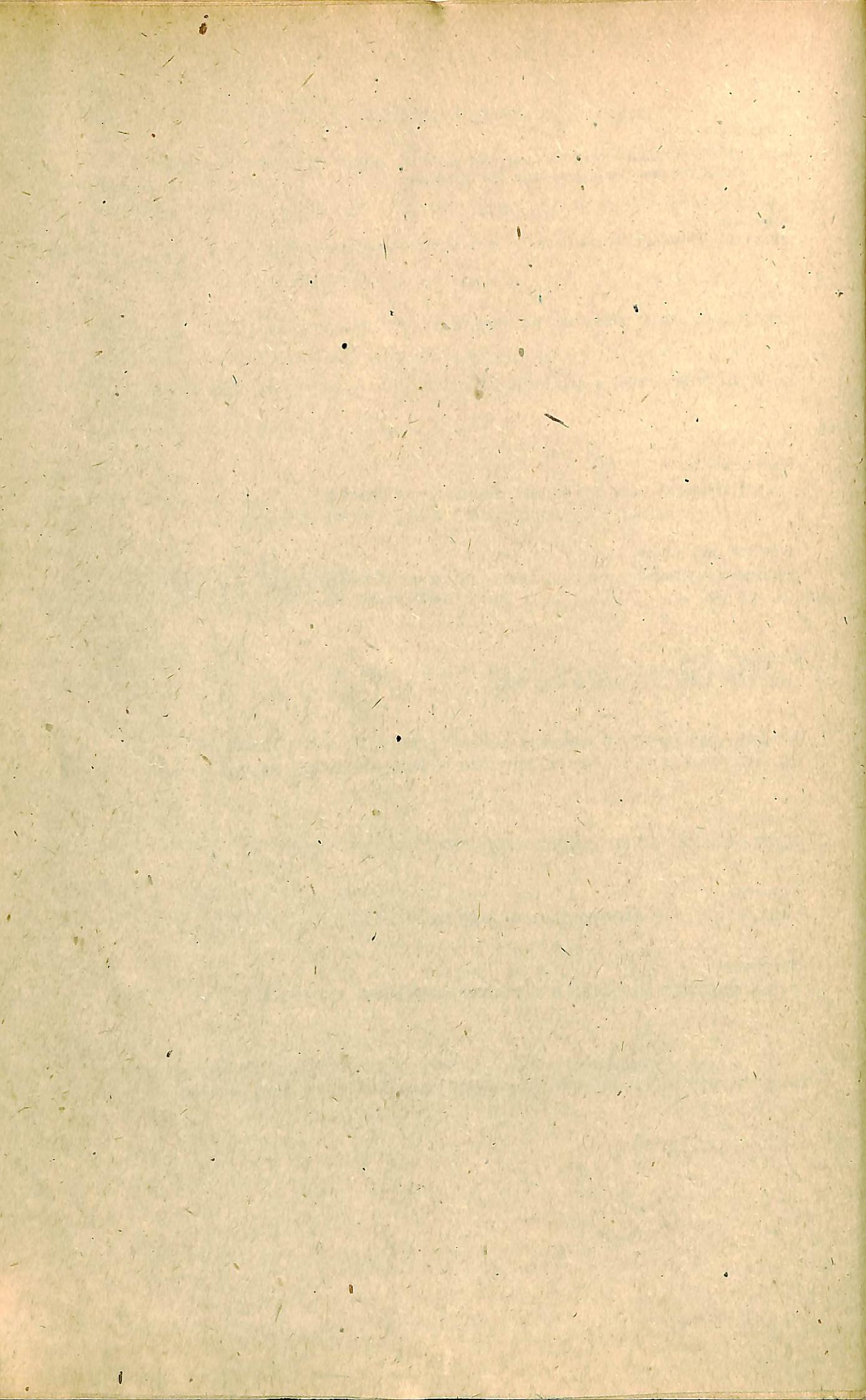
II. ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

А.В.Щербак, Л.И.Солопенко ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ ПОЯВЛЕНИЯ ЛЬДА НА СОВЕТСКОМ УЧАСТКЕ ДУНАЯ	267
Т.Н.Макаревич, Н.А.Анискина К ПРОГНОЗУ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ДУНАЕ	277
Б.М.Гинзбург ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРОКОВ ЗАМЕРЗАНИЯ И ВСКРЫТИЯ РЕК И ВОДОХРАНИЛИЩ	285
Н.Д.Бремова РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ И ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ	291

III. ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАНОСОВ

Н.Е.Кондратьев, И.В.Попов, Б.Ф.Сниченко ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗОВ ДЕФОРМАЦИИ РЕЧНОГО РУСЛА	295
М.Милорадов, М.Баомич МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗА ДЕФОРМАЦИЙ РУСЛА ВОДОТОКА В КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ	311
М.Божинович ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА ВЛЕКОМОГО НАНОСА АЛЛОВИАЛЬНОГО ВОДОТОКА ПОД ВЛИЯНИЕМ НЕРАВНОМЕРНОЙ РАБОТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ВВЕРХ ПО ТЕЧЕНИЮ	313
Д.Печинов КРИВЫЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МУТНОСТИ р.ДУНАЙ У г.ДОМ	329
В.Вукмирович, М.Радоичич, Т.Тасовац, Р.Радославлевич ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ И ДРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕКИ ДУНАЯ У БЕЛГРАДА	337
Mundt, G. VOHERSAGE DES VERLANDUNGSZUSTANDES VON FLUSSSTAUSSEEN	349
Brauner, W. AUSWIRKUNGEN KUNSTLICHER EINGRIFFE AUF DIE ZUKÜNTIGE FLUSSBETTGESTALTUNG DER MUR	357

Hinrich,H.	
NEUE GESCHIEBEMESSERGEBNISSE VON DONAU UND RHEIN MITANGABEN ÜBER AKUSTISCHE AUFZEICHNUNGEN UND FERNSEHBEOBSCHTUNGEN DER FLUSZSCHLE	363
B.Berakovic	
BACKWATER CURVES AND SEDIMENTATION IN HEPP VARAZDIN STORAGE RESERVOIR	369
J.Urban	
SEPARATION OF DIRECT RUNOFF AND BASE FLOW BY USE OF CHEMICAL ANALYSIS	375
IV. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ БАССЕЙНА ДУНАЯ ВЕСНОЙ 1970 ГОДА	
Martchinkov,B.	
DAS HOCHWASSER IM JAHRE 1970 IN DER BULGARISCHEN DONAUSTRECKE	379
E.Bodolai and K.Body	
SYNOPTIC AND HYDROMETEOROLOGICAL DESCRIPTION OF THE FLOOD WAVES ON THE TISZA RIVER IN 1970	383
М.Савич, В.Томич	
ПАВОДОЧНАЯ ВОЛНА НА р.ТИССЕ В 1970 ГОДУ	393
К.Дъякону, Д.Лэзэреску, К.Мочиорница	
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПАВОДКОВ НА ВНУТРЕННИХ РЕКАХ РУМЫНИИ ВЕСНОЙ 1970 ГОДА	425
К.Бондар	
ЖИДКИЙ И ТВЕРДЫЙ СТОК НА СРЕДНЕМ И НИЖНЕМ УЧАСТКАХ ДУНАЯ В 1970 ГОДУ	435
Р.Дражета	
АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И ПРОГНОЗ ПАВОДКА НА р.ТИССЕ ВЕСНОЙ 1970 ГОДА	441
В.Милорадов	
УСЛОВИЯ ПРОХОДЕНИЯ ПАВОДОЧНЫХ ВОЛН В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ ТИССЫ В 1970 ГОДУ	447
Список участников VI Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам	
	459



ПРЕДИСЛОВИЕ

Шестая конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам проходила 14-19 июня 1971 г. в г.Киеве, в Большом конференцзале Академии Наук Украинской ССР. Она проводилась Управлением гидрометеорологической службы УССР совместно с Украинским научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом, при участии Национальных Комитетов по МГД СССР и УССР, Дунайской Комиссии и ее Рабочей группы по научной гидрологии бассейна Дуная.

Практическую работу по подготовке Конференции осуществлял Организационный комитет, председателем которого являлся начальник Управления гидрометеорологической службы УССР Т.К.Богатырь, заместителем - директор Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института К.Т.Логвинов.

Перед Шестой конференцией стояла задача - продолжить обмен результатами научных исследований в области разработки методов гидрологических прогнозов, выполненных в придунайских странах после Пятой конференции, которая состоялась в 1969 г. в Белграде.

По сложившейся традиции за год до проведения Шестой конференции 2-5 июня 1970 г. в Киеве проведено Подготовительное совещание представителей Национальных Комитетов по МГД придунайских стран с участием представителей Дунайской Комиссии и ее Рабочей группы по научной гидрологии бассейна Дуная. На этом совещании была обсуждена программа Шестой Конференции, согласованы ее рабочие языки (русский, немецкий и английский), намечена следующая основная тематика конференции:

1) гидрологические прогнозы по рекам бассейна Дуная (прогнозы водного и ледового режима, режима наносов, русловых деформаций);

2) результаты теоретических исследований и общие методические вопросы, имеющие отношение к рекам бассейна Дуная;

3) условия формирования и прохождения весеннего половодья 1970 года на территории Болгарии, Венгрии, Румынии, Югославии.

В работе Шестой конференции придунайских стран приняли участие представители Австрии, Народной Республики Болгарии, Венгерской Народной Республики, Германской Демократической Республики, Федеративной Республики Германии, Социалистической Республики Румынии, Союза Советских Социалистических Республик, Чехословацкой Социалистической Республики, Социалистической Федеративной Республики Югославии, а также представители Дунайской Комиссии, ее Рабочей группы по научной гидрологии бассейна Дуная и ЮНЕСКО.

Делегации стран-участниц Конференции возглавляли: Э.Глазель (Австрия), Б.Маринков (Болгария), П.Барта (Венгрия), Р.Кулик (ГДР), Р.Келлер (ФРГ), В.Думитреску (Румыния), Т.Богатырь (СССР), М.Балко (Чехословакия), М.Иванович (Югославия).

Кратким вступительным словом Конференцию открыл председатель Оргкомитета Т.К.Богатырь. С приветственными речами выступили: от имени Правительства Украинской ССР министр мелиорации и водного хозяйства УССР Н.А.Гаркуша, заместитель председателя Межведомственного Комитета СССР по МГД В.И.Корзун, представители Дунайской Комиссии С.Симеонов и ЮНЕСКО Н.А.Бочин.

На последовавших за этим рабочих заседаниях конференции председательствовали главы делегаций придунайских стран поочередно в порядке алфавита этих стран; вместо главы делегации Югославии М.Ивановича председательствовал член делегации М.Милорадов.

В период подготовки к проведению конференции в Оргкомитет поступили рефераты по 47 докладам, тематика которых в общем соответствовала принятой на Подготовительном совещании. Кроме того, во время работы конференции Оргкомитету дополнительно пред-

ставлено пять докладов. На конференции из 52 зачитан 41 доклад, так как часть докладчиков не приехала. Однако Организационный комитет счел целесообразным опубликовать в настоящем сборнике и эти доклады.

По отдельным странам публикуемые доклады распределяются следующим образом: Австрия - 5, Болгария - 2, Венгрия - 6, ГДР - 4, ФРГ - 3, Румыния - 3, СССР - 13, Чехословакия - 3, Югославия - 13.

Следует отметить высокий научный уровень большей части докладов, их актуальность и наличие новых предложений. Из докладов видно, что развитие научных методов гидрологического прогнозирования во всех странах характеризуется внедрением математических методов и все расширяющимися использованием электронно-вычислительных машин.

Дискуссия по докладам на конференции проводилась после каждого доклада. На вечернем заседании 16 июня проведена общая заключительная дискуссия, в которой приняли участие И.А.Лелезняк, И.Б.Попов (СССР), Р.Келлер (ФРГ), Э.Глазель (Австрия) и Б.Марчинков (Болгария). В своих выступлениях они отметили полезность проведенной Конференции и сделали ряд общих замечаний. Итоги работы Шестой конференции подвел председательствовавший на вечернем заседании 16 июня заместитель председателя Оргкомитета К.Т.Логвинов.

На этом же заседании выступил глава делегации Народной Республики Болгарии Б.Марчинков с предложением от имени Национального Комитета по МГД и Правительства своей страны провести следующую - Седьмую конференцию придунайских стран по гидрологическим прогнозам в 1973 году в Болгарии. Участники Шестой конференции согласились с этим предложением.

На заключительном заседании 16 июня был также рассмотрен вопрос о Редакционном комитете по подготовке к печати и изданию материалов Шестой конференции. В этот комитет включены Э.Глазель и О.Грубер (Австрия), Б.Марчинков (Болгария), А.И.Афанасьев, Т.Н.Макаревич, Л.Г.Онуфриенко и В.А.Романенко (СССР).

В конце заключительного заседания 16 июня глава делегации НРБ Б.Марчинков от имени участников конференции выразил благодарность Межведомственному Комитету по МГД СССР, Оргкомитету и его председателю Т.К.Богатырю за отлично проведенную работу по организации Шестой конференции и хорошее обслуживание ее участников.

Вечером 16 июня для участников Конференции Оргкомитет устроил прием.

17 июня состоялась экскурсия по Днепру на теплоходе типа "Ракета" в г.Канев, где 62 участника Конференции побывали на могиле украинского поэта Т.Г.Шевченко и в посвященном ему мемориальном музее.

18 июня проведена экскурсия на теплоходе "Иван Франко" на Киевское водохранилище, в которой принял участие 128 человек. Экскурсантам был показан

машинный зал гидроэлектростанции и объяснены особенности сооружений гидроузла и их эксплуатации.

19 июня проведена ознакомительная экскурсия по городу Киеву; в ней приняли участие 50 человек.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Речь председателя Оргкомитета Т.К.Богатыря на открытии Шестой конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам.

Многоуважаемые товарищи, дамы и господа!

Мне выпала особая честь от имени Оргкомитета открыть настоящую VI Конференцию придунайских стран по гидрологическим прогнозам и от имени Национального комитета Украинской ССР по Международному гидрологическому десятилетию приветствовать представителей Австрии, Болгарии, Венгрии, Германской Демократической Республики, Федеративной Республики Германии, Румынии, Чехословакии, Югославии и Советского Союза, а также представителей Дунайской Комиссии, ЮНЕСКО и Председателя Рабочей группы по научной гидрологии бассейна Дуная.

Мы с особым удовлетворением отмечаем, что эта Конференция проходит в столице Советской Украины - Киеве.

Киев - крупнейший промышленный центр с многочисленными заводами, продукция которых известна далеко за пределами нашей Родины. В Киеве сосредоточены многие научные и культурные учреждения - Академия Наук, Сельскохозяйственная академия, научно-исследовательские институты, учебные заведения, киностудии, театры, музеи и дворцы культуры. В Киеве жили и творили выдающиеся деятели культуры - ученые, поэты, композиторы, художники - Шевченко, Гоголь, Иван Франко, выдающиеся гидрологи Оппоков, Огневский и многие другие.

Киев без преувеличения можно назвать городом-садом. Зеленых насаждений здесь больше, чем в любой столице мира. Ныне на каждого киевлянина приходится 18,7 кв.м зеленых насаждений, а к концу текущего пятилетия эта цифра увеличится до 19,5 кв.м.

Позвольте выразить уверенность, что после загруженного плодотворной работой дня Вы найдете возможность хорошо отдохнуть в нашем городе.

Советская Украина является одной из крупнейших республик Советского Союза. Народное хозяйство республики требует высоко организованного гидрометеорологического обслуживания; решать эту задачу призвано Управление гидрометеорологической службы Украинской ССР с его многочисленными подразделениями.

На обширной гидрометеорологической сети УГМС УССР трудится более 6000 специалистов, не считая наблюдателей ведомственных постов. Подготовка кадров гидрометеорологического профиля осуществляется на Украине в Одесском гидрометеорологическом институте и в Киевском, Харьковском, Черновицком и других университетах, а также в Харьковском и Херсонском гидрометеорологических техникумах.

Научно-исследовательская работа по гидрологическим прогнозам осуществляется на Украине в Украинском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте, а также на соответствующих кафедрах вузов.

Исследование гидрологического режима рек Дунайского бассейна и разработка методов его прогнозов осуществляется во многих научно-исследовательских учреждениях Советского Союза. Однако в этом направлении предстоит проделать еще большую работу. Мы надеемся, что полученные советскими гидрологами результаты исследований будут полезными и для зарубежных коллег, для участников настоящей Конференции. Мы с глубоким вниманием выслушаем доклады участников Конференции и с благодарностью позаимствуем их полезные достижения.

Исследования по гидрологии бассейна Дуная тесно увязаны с деятельностью Дунайской Комиссии, которая заинтересована в их успешном развитии.

VI Конференции придунайских стран предстоит рассмотреть ряд вопросов гидрологического прогнозирования режима реки Дуная и рек его бассейна.

Важнейшими проблемами остаются прогнозы уровней и расходов воды, особенно максимальных и минимальных их значений, прогнозы ледового режима, прогнозы русловых деформаций и твердого стока. Представляют интерес и общетеоретические вопросы исследований и прогнозов, которые могут быть применены для Дуная и рек его бассейна. На этой Конференции будетделено внимание также дождевым паводкам 1970 года, причинившим значительный ущерб хозяйству придунайских стран.

Разрешите выразить уверенность, что настоящая Конференция успешно выполнит стоящие перед ней задачи и явится ценным вкладом в международное сотрудничество гидрологов.

Еще раз желаю участникам Конференции плодотворной творческой работы, хорошего самочувствия, приятного и полезного пребывания в городе Киеве.

Благодарю Вас за внимание.

Приветственная речь министра мелиорации и водного хозяйства Украинской ССР
Н.А.Гаркуши

Уважаемый товарищ Председатель!
Уважаемые дамы и господа!
Дорогие товарищи!

От имени и по поручению Правительства Украинской Советской Социалистической Республики разрешите приветствовать Вас - собравшихся в этом зале участников VI Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам.

Проведение таких Конференций поочередно в каждой придунайской стране стало установившейся традицией.

Мы выражаем наше глубокое удовлетворение тем, что в настоящем году местом для проведения очередной VI Конференции избран город-герой Киев - столица Советской Украины.

Украинская ССР - одна из наиболее экономически развитых республик Советского Союза. Ее территория составляет 603,7 тыс.км², население - 47,4 млн. человек или 20 % населения Советского Союза.

Советская Украина по объему промышленной продукции является одной из десяти наиболее развитых стран мира и занимает первое место в Европе по абсолютным размерам выплавки стали и чугуна, производству проката, добыче железной руды. В республике добывается 207 млн. тонн угля или 33 %, чугуна 41,4 млн. тонн или 48 %, стали 46,6 млн. тонн или 40 % общесоюзного производства.

Высокоразвитое сельское хозяйство республики дает от общего производства по стране 20 % зерна, 59 % сахара, 42 % подсолнечника. Пахотной земли на Украине 34,2 млн. гектар, колхозов и совхозов - 10746. Основное производство зерна, в том числе озимой пшеницы, сосредоточено на юге Украины, где наиболее плодородные земли, много света и тепла. Однако имеющие здесь место периодические засухи и суховеи резко снижают урожайность сельскохозяйственных культур.

Для уменьшения ущерба от засух и создания гарантированной зоны производства зерна в южных областях широко разивается мелиорация земель. Только за 1966-70 гг. введено 440 тыс.га новых орошаемых площадей, в результате чего общая площадь поливных земель составляет 950 тыс.га. Однако, это составляет всего лишь 3 % пахотной земли.

Директивами ХХIV съезда КПСС предусматривается дальнейшее развитие мелиорации земель в нашей стране. Намечено оросить по Союзу 3 млн.га новых поливных площадей, в том числе по УССР - 400 тыс.га. Орошение земель даст возможность увеличить производство зерна, овощей, раннего картофеля и кормовых культур.

Учитывая наличие водных ресурсов в республике, площади поливных земель намечается довести до 3,2-3,6 млн.га. Эта большая проблема связана с рациональным использованием водных ресурсов, которые в нашей республике ограничены. Поэтому вопросы поставленные на обсуждение Конференции, имеют для нас первостепенное значение.

Основной целью настоящей Конференции является взаимная информация представителей придунайских стран о проводящихся в каждой стране исследованиях в области прогнозов элементов гидрологического режима рек бассейна Дуная, а также общетеоретических вопросов, которые могут быть использованы в нашей работе. Всех нас интересуют полученные в разных странах новые достижения в этой области.

С каждым годом все увеличивается поток перевозок, осуществляется строительство новых гидротехнических сооружений и гидроэнергетических комплексов. Все это ставит новые все более широкие и ответственные задачи перед гидрологами придунайских стран. К числу наиболее актуальных из них следует отнести разработку новых надежных и эффективных методов прогнозирования режима Дуная и его основных притоков. Значение таких прогнозов трудно переоценить.

Эти задачи гидрологи придунайских стран могут решить при условии регулярного взаимного обмена опытом, взаимных консультаций и тесных контактов. Созданию таких условий во многом способствует проведение регулярных Конференций по гидрологическим прогнозам.

Советские гидрологи занимаются разработкой методов прогнозов гидрологического режима дунайского бассейна. В частности, они приступили к разработке методов прогнозирования ледового режима Дуная.

Мы будем рады, если наши гости найдут в этих работах полезные для себя выводы. Точно также мы с удовольствием и благодарностью позаимствуем полезные достижения зарубежных коллег и используем их в своих работах.

Разрешите выразить уверенность, что настоящая Конференция, созданная для обсуждения научных проблем, одновременно послужит нашим общим скромным вкладом в развитие международного сотрудничества и будет способствовать укреплению взаимопонимания и дружеских связей между нашими странами, которые все, по сути дела, являются между собой очень близкими соседями. Конференция, несомненно, будет способствовать установлению, расширению и укреплению контактов между учеными стран бассейна реки Дуная. Все это будет только на пользу прогресса и дела укрепления всеобщего мира.

В заключение позвольте еще раз выразить уверенность, что настоящая Конференция по гидрологическим прогнозам успешно выполнит стоящие перед ней задачи и послужит импульсом к дальнейшему и быстрому развитию в наших странах такой многогранной и практически важной отрасли гидрологии, как гидрологические прогнозы.

Разрешите пожелать всем участникам Конференции успешной творческой работы и приятного пребывания в городе Киеве.

Благодарю Вас за внимание.

Приветственная речь заместителя председателя
Межведомственного комитета СССР по МГД
В.И.Корзуна

Уважаемый товарищ Председатель!
Дамы и господа!
Товарищи!

В связи с возрастающим значением для человеческого общества проблемы изучения, рационального использования и охраны природных вод гидрологическая наука получает разностороннее развитие.

Одной из главных задач гидрологии является создание и систематическое совершенствование методов гидрологических прогнозов. В то же время очевидно, что научный уровень и практическая эффективность методов гидрологических прогнозов зависит от глубины знания явлений и процессов, происходящих в атмосфере и гидросфере, а также от знания степени влияния на эти процессы и явления географической среды и деятельности человека.

Таким образом, все то, что относится к гидрологическим прогнозам, с одной стороны, отражает общий уровень развития гидрологической науки, а с другой стороны, - способствует расширению исследований в области гидрологии и смежных науках.

Хорошо известно, какое исключительное значение имеют гидрологические прогнозы для хозяйственной деятельности, особенно для судоходства, энергетики, ирригации, а также для предупреждения возможного ущерба вследствие наводнений и других неблагоприятных гидрологических явлений.

Отрадным является тот факт, что в бассейне Дуная, имеющем сложные гидрологические условия, осуществляется разностороннее международное научное и оперативное сотрудничество в области гидрологии. Этому сотрудничеству во многом способствует Дунайская Комиссия, ее гидрометеорологический отдел и Рабочая группа по научной гидрологии. На периодических проводимых конференциях по гидрологическим прогнозам придунайских стран происходит широкий обмен результатами научных исследований. На пяти конференциях, предшествовавших настоящей, было рассмотрено 112 научных докладов, посвященных проблеме прогноза уровней, стока, ледовых условий, русловых деформаций и другим гидрологическим явлениям. На настоящую Конференцию представлено 47 докладов.

Каждая из придунайских стран вносит значительный вклад в развитие гидрологических исследований

в бассейне Дуная. В Советском Союзе научным исследованиям явлений и процессов, происходящих в природе, уделяется большое внимание. Это относится и к области гидрологических прогнозов, что находит отражение и в докладах, представленных на настоящую Конференцию.

Разрешите от имени Главного управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР и Национального Комитета СССР по Международному гидрологическому десятилетию сердечно приветствовать всех участников Конференции и пожелать Вам плодотворной работы и приятного пребывания в древнем и всегда прекрасном городе Киеве.

Благодарю за внимание.

обходимых мероприятиях относительно уточнения данных о расходах воды. Можно ожидать, что после введения в действие указанных рекомендаций точность данных, служащих для составления прогнозов, значительно улучшится.

Уважаемые дамы и господа! С уверенностью можно сказать, что в течение последнего десятилетия методы прогнозирования гидрологических элементов значительно улучшились, и в этом, несомненно, большую роль сыграли прошедшие конференции по прогнозам. Мы убеждены, что и настоящая VI Конференция по прогнозам будет успешно продолжать плодотворную деятельность предыдущих конференций на более высоком уровне.

Нельзя также не подчеркнуть, что результаты работы Конференций по прогнозам являются существенным вкладом в проводимые в настоящее время мероприятия по Международному гидрологическому десятилетию и тесно переплетаются с усилиями Дунайской Комиссии, направленными на расширение научного сотрудничества по гидрологии в бассейне Дуная.

Постоянное и интенсивное развитие науки во всех областях жизни, в том числе и в области гидрометеорологии, в настоящее время достигло такой степени, при которой получение дальнейших результатов, по нашему мнению, возможно лишь при международном сотрудничестве.

Разрешите пожелать Вам больших успехов в Вашей работе и выразить уверенность, что Ваша деятельность будет и впредь способствовать повышению качества прогнозов и, следовательно, еще более эффективному использованию их в судоходстве на Дунае.

Благодарю Вас за внимание.

Приветственная речь помощника директора Секретариата и Рабочего аппарата Дунайской Комиссии
С.Симеонова

Господин Председатель!
Уважаемые дамы и господа!

С большим удовлетворением я выполняю поручение аппарата Дунайской Комиссии приветствовать Вас, участников VI-ой Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам.

Как известно, основной задачей Дунайской Комиссии является обеспечение наилучших условий судоходства на Дунае. Многие из проблем, возникающих в связи с судоходством, связаны с гидрометеорологическими исследованиями. Самыми важными из них являются гидрологические прогнозы. Безопасность судоходства на Дунае в настоящее время не может быть обеспечена без качественных гидрологических прогнозов, большинство которых основано на метеорологических исследованиях и наблюдениях. Отсюда ясно, какой большой интерес проявляет Дунайская Комиссия к вашей деятельности, направленной на улучшение качества гидрологических прогнозов.

В области прогнозов нас в первую очередь интересуют исследования и разработка методов долгосрочного прогнозирования уровней воды в период межени. В этом вопросе мы ожидаем большую помощь со стороны метеорологов, так как для составления указанных прогнозов необходимо иметь достоверный прогноз погоды.

Некоторые методы прогнозирования уровней воды и ледовых явлений широко применяются на практике в интересах дунайского судоходства.

Для составления прогнозов, как известно, необходимо иметь достоверные данные о разных гидрологических элементах; исходя из этого, XXIX сессия Дунайской Комиссии в этом году приняла два важных документа - Рекомендации по координации гидрометеорологической службы на Дунае и Рекомендации о не-

Address of Dr. N.A. Bochin

Secretariat of the Co-ordinating Council
for the International Hydrological Decade

Mr. Chairman, Ladies and Gentlemen,

It is honour and a pleasure for me to represent the Director-General of Unesco at the Sixth Conference on Hydrological Forecasting of Danubian Countries.

First of all, I should like to thank you, Mr. Chairman, for the possibility given to me to have the floor and to present some information concerning the IHD programme.

I do not intend to use your limited time by giving details of all aspects of the IHD programme. I should only like to draw your attention to the most important questions of the IHD programme related to Danubian countries and to the programme of the Conference.

ОБЩАЯ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ ДИСКУССИЯ ПО ИТОГАМ ШЕСТОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

На заключительном вечернем заседании Конференции 16 июня ее участники обменялись мнениями и замечаниями по общим итогам работы Конференции и высказали свои предложения и пожелания на будущее.

И.А.ХЕЛЕЗНЯК (СССР).

Мне хочется сделать несколько замечаний по группе докладов, касающихся расчетов и прогнозов уровней и расходов воды рек бассейна Дуная в 1970 г. Во-первых, приятно отметить повышенное внимание к синоптическим условиям половодья 1970 года. Такой генетический подход к условиям его формирования заслуживает одобрения.

Интересны исследования распространения подпора от Дуная по р. Тиссе. Нам также приходится сталкиваться с подобным явлением на приусыевом участке р. Десны, где при высоких горизонтах воды Днепра возникает ясно выраженный подпор.

Весенний режим 1970 года был весьма интересен и на Днепре. В марте положение еще не внушало тревоги, но в начале апреля резкое потепление в верхней части бассейна до плюс 8–9°, сопровождающееся дождевыми осадками, вызвало интенсивное снеготаяние; эти обстоятельства обусловили формирование на Днепре высокого, близкого к историческому, половодья. Этот пример показывает, что эффективность прогнозов в большей степени зависит от своевременного учета синоптической обстановки.

Можно отметить успешную оперативную деятельность в 1970 г. Управления гидрометслужбы и Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института: своевременное уточнение первого прогноза и расчеты движения воды на участке от одорных створов на Днепре, Соже и Припяти, для которых был дан прогноз весеннего гидрографа, до входных створов в Киевское водохранилище (протяженность этого участка около 200 км), учет трансформации воды половодья в самом водохранилище при наиболее полном использовании его регулирующей емкости, расчет движения центральной части весеннего гидрографа р. Десны на участке от Чернигова до устья (более 200 км) – все это позволило предсказать за 5–6 суток увеличение расходов Днепра у Киева с 10 до 18 тыс. м³/сек.

Кроме того, по гидрографу весеннего стока у Киева и по расходам воды основных притоков Днепра на участке от Киева до устья реки (более 1000 км) в Украинском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте на электронной цифровой вычислительной машине выполнены расчеты 14 вариантов наполнения остальных нижерасположенных водохранилищ днепровского каскада (Кременчугского, Днепродзержинского, оз. им. В.И. Ленина и Каховского), что дало возможность выбрать наиболее оптимальный вариант, прежде всего для уменьшения затоплений тер-

ритории. В результате продуманного режима наполнения Кременчугского водохранилища максимальные расходы в нем были снижены на 8–9 тыс. м³/сек.

Думается, что наши коллеги из придунайских стран еще не раз обратятся к изучению метеосиноптической обстановки 1970 года, весьма интересной и поучительной.

В докладах были освещены различные способы расчета трансформации волн паводков в процессе их движения на Дунае, Тиссе и других реках, основанные на использовании кривых добегания, аналоговых машин и др. Нам представляется наиболее целесообразным расчет трансформации, основанный на решении уравнения водного баланса по участкам, в пределах которых время добегания не превышает расчетного интервала, и на учете изменения объемов воды по кривым зависимости объемов от расходов в нижнем створе каждого участка.

Вероятно целесообразно было бы организовать обмен мнениями между заинтересованными лицами по поводу методов расчета движения весеннего стока в реках для того, чтобы определить наиболее оптимальный метод для условий бассейна Дуная.

Р.КЕЛЛЕР (ФРГ).

Я хочу сделать несколько замечаний о работе Конференции. Прежде всего разрешите поблагодарить Организационный комитет за хорошую организацию работы Шестой конференции придунайских стран. Здесь мы услышали много интересного и полезного для себя. Нам кажется, что и на следующей конференции будут обсуждены такие вопросы, как, например, анализ паводков 1970 г. Заслушанные здесь доклады по бассейну Дуная представляют для нас практический интерес. В каждом методе гидрологических прогнозов необходимо учитывать генезис того явления, которое прогнозируется. В заключение я хочу сказать, как представитель ФРГ, что нам приятно было бы приветствовать участников следующей Седьмой конференции в нашей стране.

И.В.ПОПОВ (СССР).

Так как я работаю в области русловых процессов, то позволю себе высказать несколько замечаний о докладах, касающихся этого вопроса.

Прежде всего отмечу безусловную полезность таких конференций. Круг вопросов, рассмотренных на Конференции, был достаточно широким. Не все доклады относились к проблеме гидрологических прогнозов, но следует помнить, что дальнейшее развитие прогнозов требует хорошо обоснованной теории по всем вопросам гидрологии.

Мне особенно близки доклады господина Браунера и Божиновича. В первом докладе было показано, что решать вопрос об искусственном изменении русла реки только гидродинамическим методом мы пока не можем. Божинович также признал тот факт, что когда речь идет об управлении русловыми процессами, то

решение этого вопроса чисто гидравлическим методом невозможно.

Хотелось бы высказать пожелание о создании стройной и общепринятой теории русловых процессов. Мне представляется, что у нас укоренилось несколько неправильное представление о деформации в руслах рек, которую мы изучаем. Я могу привести цифры по ряду средних и крупных рек СССР, протяженностью до 1500 км. Смещение берегов этих рек в плане на 10-15 метров не представляется явлением исключительным. Если учесть, что гидротехнические сооружения проектируются на 50-100 лет, то вполне естественно, что даже деформацию на 1 метр в год следует признать весьма существенной. На средних и малых реках нередко наблюдаются крупные песчаные скопления, высотой до 10-12 м. Из этого вытекает вывод, что исследование русловых процессов нужно вести не в отдельных створах, а по реке в целом, т.е. необходимо рассматривать русловой процесс как процесс дискретный.

Мы видим выход из создавшегося в настоящее время положения в изучении русловых процессов в применении совокупности методов морфологии и гидродинамики. В настоящее время встает вопрос как на морфологию наложить гидродинамику. Если мы решим этот вопрос, то получим возможность надежного прогноза руслового процесса в естественных и зарегулированных условиях рек.

Э. ГЛАЗЕЛЬ (Австрия).

Уважаемые господа, позвольте высказать некоторые общие замечания. Все мы можем быть довольны работой Конференции и ее результатами. Как представитель Австрии я могу сказать, что мы представляем здесь небольшую страну и небольшую гидрометеорологическую службу, но тем не менее наши данные имеют большое значение для составления прогнозов некоторых характеристик режима Дуная на нижележащих ее участках.

В последнее время математика все больше проникает в гидрологические исследования. Это мы почувствовали по заслушанным докладам. В разработке методов гидрологических прогнозов электронные вычислительные машины занимают сейчас ведущие позиции. Однако многие гидрологи имеют недостаточный контакт с математиками, а математики не работают в области гидрологии.

Положение австрийских гидрологов осложняется тем, что вследствие небольших размеров бассейна нам труднее решать проблему прогнозов стока. На Нижнем Дунае эта задача решается проще. Географическое положение наших придунайских стран различно, в связи с чем на них по-разному проявляется влияние Средиземного моря и Атлантики, что также затрудняет разработку методов прогнозирования.

Наиболее сложной проблемой является прогнозирование ледовых явлений, особенно в верховье Дуная. В нижней его части дело обстоит лучше, так как здесь господствует более континентальный климат.

За последние 10 лет на австрийском участке Дуная возникло много гидроэлектростанций, произведена канализация русла. Все это изменило условия ледообразования. Теперь нам придется выяснить и уточнить изменившийся характер режима заново, поэтому, естественно, нам необходим опыт коллег. В этом отношении данная Конференция была полезной.

Очень целесообразным и актуальным было рассмотрение на Конференции паводка 1970 года. Такие обсуждения на подобных конференциях будут способствовать тому, что гидрометслужбы придунайских стран лучше будут понимать друг друга.

Важным вопросом является также деформация русла, так как она влияет на условия судоходства на Дунае. От хорошего прогнозирования этого явления будут в выигрыше не только австрийцы, но и другие придунайские страны.

Б. МАРЧИНКОВ (Болгария).

К настоящему времени конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам были проведены в Венгрии, Австрии, Чехословакии, Югославии, Румынии. Теперь Шестая конференция проводится в СССР. Через два года предстоит провести Седьмую конференцию. По просьбе Национального Комитета по МГД и правительства НРБ вновь предложение провести ее в Болгарии. Прошу участников Шестой конференции придунайских стран поддержать данное предложение.

Пользуясь правом старейшего на этом заседании от имени всех присутствующих здесь участников Шестой конференции придунайских стран выражая большую благодарность Национальному Комитету СССР и УССР по МГД, Оргкомитету и лично его председателю, многоуважаемому господину Богатырю за отличную организацию Конференции.

На этой Конференции мы имели возможность заслушать ряд интересных докладов по вопросам гидрологических прогнозов, а также по вопросам деформации русла рек бассейна Дуная. Несомненно, что Шестая конференция придунайских стран внесет свой вклад в дело дальнейших разработок и развития прогнозов по бассейну Дуная.

Приятно отметить, что Конференция проходила в теплой, дружественной обстановке.

Мне хочется поблагодарить также весь обслуживающий персонал — переводчиков, секретарей и др., которые своей работой помогли нам провести Конференцию на должном уровне.

Еще раз сердечно благодарю всех участников Конференции и желаю дальнейших творческих успехов в нашей общей работе.

К. Т. ЛОГВИНОВ (СССР).

Организационному Комитету Шестой конференции придунайских стран было заранее известно о намерении болгарской делегации обратиться с предложением к придунайским странам о проведении следующей конференции по гидрологическим прогнозам в Народной Республике Болгарии. Все руководители делегаций

были ознакомлены с этим предложением проф. Марчинкова и поддержали его. Учитывая это, я полагаю, мы можем записать в протоколе Шестой конференции соответствующий пункт. Если нет возражений, то разрешите еще раз поблагодарить представители НРБ проф. Марчинкова за щедрое приглашение.

Как известно, Подготовительное совещание представителей Национальных комитетов по МГД, состоявшееся 2-5 июня 1970 г. в г. Киеве, решило для подготовки к печати и изданию материалов Шестой конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам избрать Редакционный комитет, в который включить представителей Австрии, Болгарии и СССР. После консультаций с главами делегаций этих стран поступили предложения о персональном составе этого комитета: от Австрии - Э. Глазель, О. Грубер; от Болгарии - В. Марчинков; от СССР - А. И. Афанасьев, Т. Н. Макаревич, Л. Г. Онуфrienко, В. А. Романенко. Если нет возражений, то предлагаю принять это сообщение о сведении.

Для Вашего сведения могу также сообщить, что в работе Шестой конференции приняло участие 57 представителей зарубежных стран и 79 представителей от различных организаций СССР. На Конференции присутствовали представители ЮНЕСКО, Дунайской Комиссии, Министерства иностранных дел СССР и УССР, представители Совета Министров УССР, Академии Наук СССР и УССР, Главного Управления гидрометслужбы, Гидрометцентра, Государственного гидрологического института, Украинского и Дальневосточного институтов гидротехники и мелиорации, Киевского государственного университета, Украинской сельскохозяйственной академии, Среднеазиатского и Одесского гидрометеорологических институтов, специалисты и научные работники Управления гидрометеорологической службы УССР и УкрНИИМИ.

Всего на настоящей Конференции заслушан и обсужден 41 научный доклад по вопросам гидрологических прогнозов и режима рек бассейна Дуная.

Знакомясь с материалами Конференции, мы можем

отметить высокий уровень математических разработок в заслушанных докладах. Многие результаты исследований получены на электронных вычислительных машинах. Следует ожидать, что отмеченные особенности еще более широко будут представлены на следующей Седьмой конференции.

Качество прогнозов зависит от правильной оценки ситуации, в которой развивается прогнозируемое явление. Приятно отметить, что в ряде докладов были освещены оригинальные подходы к учету метеорологических факторов и синоптической обстановки.

Мы можем с полной уверенностью сказать, что работа Шестой конференции и ее материалы вызовут большой интерес со стороны специалистов наших стран, а применение на практике рассмотренных нами методов и приемов будет способствовать повышению качества обслуживания придунайских стран прогнозами.

Приятно отметить, что Конференция проходила в духе дружественного сотрудничества и делового контакта специалистов разных стран. Позвольте от имени Оргкомитета поблагодарить докладчиков за интересные сообщения. Оргкомитет поручил мне поблагодарить также всех участников Конференции, географически представляющих разные учреждения на громадной территории от Парижа до Ташкента и Дальнего Востока, от Ленинграда до Софии.

Оргкомитет приложил большие усилия для обеспечения успешного проведения Конференции. Но все же не удалось избежать и недостатков. Так, например, мы недостаточно хорошо организовали синхронные переводы докладов, за что я прошу нас извинить. Я думаю, что не будет возражений выразить от имени участников Конференции признательность руководству Академии Наук УССР за предоставленное нам для работы хорошо оборудованное помещение.

В заключение разрешите мне от имени Оргкомитета еще раз поблагодарить всех участников Конференции, пожелать здоровья, новых творческих успехов, новых встреч.

NEUE AUFGABEN AUF DEM GEBIETE DER HYDROLOGISCHEN VORHERSAGEN

LÁSZLÓFFY, W.

Zentralstelle für wasserwirtschaftliche Dokumentation und Information
Budapest, Ungarn

Р е з и м е

Вследствие роста площадей орошения, наблюдающегося во всем мире развития промышленности, урбанизации и повышения требований гигиены потребности в воде стремительно увеличиваются. Все большее использование воды, а также строительство крупных гидротехнических сооружений комплексного назначения преобразуют и водообмен в природе. Вследствие этого плановое использование водных ресурсов возлагает на гидрологов новые задачи, состоящие в перспективном прогнозировании изменения водных ресурсов и водопотребления.

Автор излагает различные эксперименты прогнозирования качественных и количественных изменений водных ресурсов, а также формирования потребностей в воде отдельных стран, обобщает подлежащие решению задачи по развитию необходимой наблюдательной сети, о которой следует позаботиться уже сейчас даже там, где признаков дефицита воды еще не наблюдается, так как научные исследования должны опережать возникновение нужд повседневной жизни.

anlagen verändern den Wasserhaushalt der Natur. Als Folge dieser Umwandlung mißt die planmäßige Wasserwirtschaft neue Aufgaben dem Hydrologen zu: nämlich die langfristige Vorausbestimmung der Gestaltung der Wasservorräte und des Wasserbedarfes.

Nach Besprechung der in den verschiedenen Ländern durchgeföhrten Vorhersage-Versuche, die die Ermittlung der in quantitativer und qualitativer Hinsicht zu erwartenden Änderungen der Wasservorräte sowie der Gestaltung des zukünftigen Wasserbedarfes zum Ziel haben, spricht der Verfasser über die notwendigen Messungen und die Entwicklung jener Beobachtungsnetze, die für die Lösung dieser neuen Aufgaben unentbehrlich sind. Da die wissenschaftliche Forschung den Anforderungen des täglichen Lebens weit vorangehen muß, soll an die Schaffung entsprechender Grundlagen schon heute und auch dort gedacht werden, wo von einem Wassermangel derzeitig noch keine Rede ist.

Summary

Water demands are rapidly increased by supplementing and complementary resources irrigations, by the industrial development to be witnessed all over the world and by urbanization and growing hygienic requirements. Increasing water utilization and the largescale and multiple-purpose hydrotechnical installations transform the water balance of nature. A planned management of water resources raises a new challenge to hydrologists: the long-range forecasting of the shaping of future water resources and water demands.

The author gives a review of the various experiments of forecasting procedures performed in individual countries concerning the changes occurring in water resources both as regards quantity

K u r z f a s s u n g

Infolge der wachsenden Bedeutung der landwirtschaftlichen Bewässerung, der Industrialisierung der Welt, der Urbanisation und der überall steigenden hygienischen Ansprüchen nimmt der Wasserbedarf in allen Ländern stets zu. Die immer größeres Maß erreichende Wassernutzung und die für ihre Zwecke errichteten großzügigen hydrotechnischen Mehrzweck

and quality as well as the shaping of water demands, and thereafter the measures to be taken for the development of the measuring and observation station network - in order to achieve the solution, of the tasks - are summarized. All this should be thought of already and even at places where the signs of water deficiency are not apparent as yet, as scientific investigations must precede the appearance of the needs of every day life.

zu finden, dessen Wasserführung noch den ungestörten natürlichen Zustand wiederspiegeln würde.

Unter solchen Umständen ist es selbstverständlich, daß man sich in vielen Ländern mit der optimalen Nutzanwendung der beschränkten Wasservorräte und - damit verbunden - mit der Frage des Gewässerschutzes befaßt, also die Notwendigkeit einer geregelten Wasservorratswirtschaft erkannt hat, welche - natürlich - die Kenntnis der künftigen Gestaltung der Wasservorräte und des Wasserbedarfes zur Voraussetzung hat [3].

1. Notwendigkeit einer Wasservorratswirtschaft

Der Wasserbedarf der Menschheit nimmt in aller Welt zu. Infolge der Bewässerung stets größerer Flächen wächst der tatsächliche Wasserverbrauch sprunghaft. Die industrielle Entwicklung sowie die fortschreitende Urbanisation haben mengenmäßig kleineren Einfluß, sie erschweren aber die Befriedigung des Wasserbedarfes durch die stark zunehmende Verunreinigung der Gewässer.

Der Wasserbedarf der Menschheit belief sich - nach M. I. Lwowitsch [8] - auf 3375 km^3 um 1965 und wird bis zur Jahreswende auf 8600 km^3 , also auf mehr als das Doppelte, ansteigen. Aus dieser Zunahme erhellt aber die Schwierigkeit des Problems keinesfalls in seiner wahren Größe. Weder die Wasservorräte, noch die Bevölkerung sind auf dem Erdball gleichmäßig verteilt, infolgedessen weist auch der Wasserbedarf große räumliche Unterschiede auf. Dabei sind Wasservorrat und Wasserbedarf auch zeitlich stark veränderlich. In der Wasserversorgung machen sich schon heute an vielen Stellen der Welt zeitweise große Schwierigkeiten bemerkbar. In erster Reihe nehmen es die Bewohner der Großstädte unmittelbar wahr: die Wasserklemmen werden immer häufiger und bei Erweiterung der Wasserwerke muß das Wasser von stets größeren Entfernung hergeholt werden. Obzwar in der Tagespresse nicht viel darüber gelesen werden kann, ist der Kampf um das Wasser seitens der Industrie und der Bewässerungswirtschaft sehr schwer und führte zum Bau riesiger Mehrzweckspeicher und großer Überleitungskanäle. Für die Zukunft werden gigantische, fast phantastische technische Pläne entwickelt.

Das natürliche hydrographische Netz der Wasserläufe und deren naturgegebene Wasserführung werden durch menschliche Tätigkeit an immer mehr Stellen und in zunehmendem Maß umgestaltet. Dieser Vorgang ist nicht nur im großen Maßstab zu beobachten, er spielt sich auch im kleinen ab. Auch innerhalb des Einzugsgebietes der Donau ist kaum ein Wasserlauf

2. Die Planungsgrundlagen der Wasservorratswirtschaft [5]

Die Größe der Wasservorräte ist naturbedingt. Wir können sie kaum beeinflussen. Da wir aber durch unsere wasserwirtschaftlichen Maßnahmen ihre räumliche und zeitliche Verteilung, ferner ihre Qualität ändern, sind Vorhersagen - richtiger: Vorausberechnungen - bezüglich der Wasservorräte notwendig.

Art, Maß und Zeitpunkt der menschlichen Eingriffe werden aber nach dem jeweiligen Bedarf und durch wirtschaftliche Erwägungen bestimmt. Die Lösung des Problems ist also keine hydrologische Aufgabe, sie lastet vorwiegend auf dem planenden Ingenieur. Die Aufgaben des Hydrologen beziehen sich hauptsächlich auf die Vorausberechnung

- der Folgen der gesteigerten Ausbeutung der Grundwasservorräte und
- der Verunreinigung und der Temperaturerhöhung der Gewässer.

Mit der Vorausberechnung der künftigen Gestaltung des Wasserbedarfes beschäftigen sich bereits in mehreren Ländern besondere Organe der Wasservorratswirtschaft. Da aber die Befriedigung des Bedarfes nur zu Lasten der Vorräte möglich ist, die wir aber nur hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung, nicht aber in ihrer Größe beeinflussen können, müssen die Wasservorratswirtschaft betreffenden Pläne auf gewässerkundliche Grundlagen gestellt werden.

Es handelt sich also keineswegs um eine einfache Trend-Untersuchung. Obzwar bei der Planung von der Entwicklungstendenz hervorgegangen wird, müssen die verschiedenen Wasseransprüche nach ihrer Wichtigkeit eingereiht werden und es genügt nicht, nur darauf achtzugeben, daß ihnen - unter Berücksichtigung einer gewissen Toleranz - jederzeit entsprochen werden kann, sondern es muß auch eine

optimale Ausnutzung des Gesamtvorrates angestrebt werden.

Die Unterscheidung der verschiedenen Ansprüche gemäß ihrer Wichtigkeit wie auch die Suche nach einer optimalen Ausnutzung der Wasservorräte hängen mit der Frage der Wassergüte aufs engste zusammen. Es wäre verfehlt, Wasser von hoher Qualität für Zwecke zu bestimmen, wofür auch Wasser minderer Beschaffenheit - oder sogar unreines Wasser - genügt. Die künftige Gestaltung des Wasserbedarfes muß also unter Berücksichtigung der Güteansprüche für die verschiedenen Wasserarten getrennt ermittelt werden [1].

Die große Abwasserbelastung der Gewässer kann die Speicherung - im Interesse der Niederwasseranreicherung - notwendig machen. Auch der Ausgleich zwischen dem entgegengesetzten Verlauf von Wasserdargebot und Wasserbedarf zwingt zur Speicherung. Sie kann auf der Oberfläche - in natürlichen oder künstlichen Stauweiichern - aber auch unterirdisch stattfinden. In den Planungen müssen nicht nur Zeitpunkt und Häufigkeit des Auftretens von Wasserklemmen, sondern auch die Größe der Fehlwassermengen berücksichtigt werden. Natürlich muß man auch an die Verdunstungs- und Versickerungsverluste denken.

Die optimale Ausnutzung der Wasservorräte setzt auch den Ausgleich zwischen der räumlich unterschiedlichen Verteilung der Wasservorräte und der Wassernutzungen voraus. Die Pläne der Wasservorratswirtschaft müssen daher nach Einzugsgebieten bearbeitet werden.

Die Planung selbst ist im wesentlichen eine technisch-wirtschaftliche Aufgabe. Da sie aber nach Wasserarten getrennt, unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Unterschiede und der Abwasserbelastung erfolgt, ist sie mit einer Reihe von zukunftsbezogenen hydrologischen Fragen verbunden. Der Hydrologe muß sich darauf vorbereiten, diese Fragen möglichst verlässlich beantworten zu können.

3. Ermittlung des künftigen Wasserbedarfes

Durch die Pläne der Wasservorratswirtschaft soll die Möglichkeit einer Befriedigung des Bedarfes gefunden werden, wobei entweder der Bedarf selbst, sei es auf Grund der wirtschaftlichen Entwicklungspläne oder der Entwicklungsrichtung, festgestellt wird oder die Gesetzmäßigkeiten der zeitlichen Gestaltung der Wasservorräte bestimmt werden, um dann die wirtschaftlichen Entwicklungspläne den zu kritischen Zeiten verfügbaren Vorräten anpassen zu können [12].

Infolgedessen ist die Kenntnis der jährlichen und vieljährigen periodischen Schwankung der Wasserführung bzw. der in den einzelnen Zeitschnitten des Jahres mit verschiedenen Häufigkeiten verfügbaren Abflüsse (bzw. des Grundwasserdargebotes) von grundlegender Wichtigkeit.

Außer den mengenmäßigen Angaben ist auch die Kenntnis der die Wasserverschaffung betreffenden Angaben unentbehrlich, da auf Grund dieser letzteren die zulässige Belastung der Gewässer mit Schmutzstoffen bzw. die Grenze der erträglichen Erhöhung der Wassertemperatur bestimmt werden kann.

In den wasservorratswirtschaftlichen Plänen der verschiedenen Länder wird immer ein Unterschied gemacht zwischen Wassernutzungen, die den Wasservorrat unverändert lassen bzw. solchen, die mit Wasserentnahme verbunden sind. Im Falle der Letzteren wird die für den weiteren Gebrauch verlorene Wassermenge ermittelt [13].

Dieser Einteilung entsprechend wird einerseits die Gestaltung der Ansprüche des Wasserverkehrs, der Laufkraftwerke, der Erholung und des Wassersports (die nicht mit Wasserentnahme verbunden sind) untersucht, andererseits der Bedarf der kommunalen, industriellen und landwirtschaftlichen Wassernutzungen bestimmt, welche das für sie nötige Wasser herbeileiten und nach Gebrauch im ganzen oder zum Teil als Brauch- oder Abwasser zurückleiten bzw. verbrauchen.

In den Schätzungen hinsichtlich der kommunalen Wasserversorgung werden die Großstädte einzelweise behandelt, wogegen der Bedarf der kleineren Städte und der Dörfer nach gewissen Typen gruppenweise berechnet werden kann [12]. Als Grundlage der Schätzungen dienen einerseits der zu erwartende Bevölkerungszuwachs, andererseits der Rhythmus der Bedarfszunahme je Kopf und Tag. Ersterer wird durch den Urbanisationsvorgang beeinflußt, letzterer wird außer den hygienischen Ansprüchen hauptsächlich durch die technische Entwicklung der Wasserwerke bestimmt.

Die größten Wasserverbraucher der Industrie sind die thermischen und die Kernkraftwerke. Ihr Wasserbedarf wird darum getrennt untersucht. Sie benutzen das Wasser zu Kühlzwecken, folglich wird es nicht verschmutzt, nur seine Temperatur gehoben. In Kenntnis der Brauchwassermengen sowie der Abfluß- und Temperaturverhältnisse des Vorfluters kann die zulässige thermische Belastung desselben errechnet werden [6, 10]. Wird die solcherart bestimmte Grenze überschritten, so muß eine andere Kühltechnik des Kraftwerkes vorgesehen werden: es müssen teurere Vorgänge, wie Luftkühlung oder im Küstengebiet der Gebrauch von Meereswasser, angewendet werden.

Der künftige Bedarf der Industrie wird auf Grund der Entwicklungstendenzen nach den verschiedenen Industriezweigen getrennt ermittelt. Die in die Produkte eingebaute Wassermenge (die höchstens

einige Prozente des Gesamtbedarfes ausmacht) wird auf Grund der auf die Produktionseinheit (Tonne, m³) bezogenen Ziffern geschätzt. Ähnlich kann die spezifische Menge der die Werke verlassenden Schmutzstoffe berechnet werden, welche bessere Grundlagen zur Planung liefert als die früher betrachtete Abwassermenge. Umsomehr, da einerseits die zunehmenden Schwierigkeiten (bzw. Kosten) der Wasserbeschaffung, andererseits die schon in mehreren Staaten - z.B. in Ungarn und in Frankreich - eingeführten Wassernutzungsgebühren die Betriebe zur zunehmenden Sparsamkeit zwingen. Bezeichnend ist in dieser Beziehung, daß die zur Herstellung von 1t Stahl gebrauchte Wassermenge früher 200-240 - sogar 300 - Kubikmeter betrug. Vor 10 Jahren wurde das Minimum mit 4 bis 5 m³/t angegeben [7] und nun kann man in der Literatur von 1,4 m³/t lesen [2]. Diese Entwicklung ist dem wiederholten Gebrauch des Wassers, der innerbetrieblichen Rezirkulation desselben zu verdanken. Die Zunahme der Wiederbenützung des Wassers muß nach den einzelnen Industriezweigen getrennt vorausbestimmt und berücksichtigt werden.

In den Plänen wird auch auf die Wassergüte Rücksicht genommen (die Lebensmittel - oder die pharmazeutische Industrie benötigen z.B. Wasser von Trinkwasserqualität) bzw. in Betracht gezogen, daß ein Teil der Betriebe - teils aus qualitativen Gründen - das Wasser von städtischen Wasserwerken bezieht und nur ein - zwar größerer - Teil derselben über ein eigenes Wasserwerk verfügt.

In Bergwerksgebieten werden - zum Schutze der Betriebe - bedeutende Wassermengen zu Tage gefördert. Die zu erwartende Zunahme dieser Förderung läßt sich auf Grund der Extrapolation der Produktionsangaben abschätzen.

Der Bedarf an Bewässerungswasser ist selbst in den Ländern des mäßigen Klimas in raschem Aufstieg begriffen und ist, im Gegensatz zum industriellen Wasserbedarf, dadurch gekennzeichnet, daß das Wasser für den weiteren Gebrauch zum größten Teil verloren geht. Seine künftige Größe kann auf Grund der jährlichen Zunahme der bewässerten Flächen, der Verteilung der verschiedenen Bewässerungsarten und der Betriebsnormen berechnet werden. Zur Kontrolle kann auch der zur Herstellung der künftigen (bzw. notwendigen) landwirtschaftlichen Produkte nötige Wasserverbrauch abgeschätzt werden.

Zu den landwirtschaftlichen Wassernutzungen gehört auch die Frischwasserversorgung der Fischteiche, die ihren Höchstwert im allgemeinen zu einem Zeitpunkt erreicht, der mit dem Spitzenbedarf der Bewässerung nicht zusammenfällt - ferner der Wasserbedarf der Tierzucht, der sich auf Grund der zu erwartenden Zunahme des Bestandes sowie von Normzahlen je Stück ermitteln läßt.

Zum Schluß soll von der Speicherung gesprochen werden, welche die zeitliche Verteilung des Wasserdargebots grundsätzlich verändert und oft mit

Wasserüberleitung aus angrenzenden fremden Einzugsgebieten verbunden ist. In den Plänen der Wasservorratswirtschaft sollen natürlich nicht nur die geplanten größeren Stauseen berücksichtigt werden, sondern auch die kleinen Stauweiher, die infolge ihrer stets steigenden Zahl ebenfalls bedeutenden örtlichen Einfluß auf die Wasserverhältnisse ausüben.

4. Die Folgen der an die hydrologische Datenlieferung gestellten Ansprüche

Die Pläne der Wasservorratswirtschaft sind, wie wir sehen, auf demographischen und wirtschaftsstatischen Angaben aufgebaut, reell gelten können sie aber nur unter Berücksichtigung der gewässerkundlichen Verhältnisse. Die Hydrologen müssen an die neuen Anforderungen denken, die an die Datenlieferung und die mit ihr verbundenen Vorhersagen gestellt werden. Die neuen Anforderungen machen die Weiterentwicklung der Beobachtungsnetze und des Beobachtungskreises notwendig [4].

Als im Laufe des vorigen Jahrhunderts mit dem Ausbau von gewässerkundlichen Beobachtungsnetzen begonnen wurde, ließ man sich bei der Wahl der Beobachtungsstellen von geographischen Gesichtspunkten leiten. Die Lage der Pegelstationen wurde in den einzelnen Gewässersystemen so gewählt, daß die Wasserführung der wichtigeren Nebenflüsse in der Nähe ihrer Einmündung und jene des Hauptflusses unterhalb der Mündungsstellen erfaßt werden konnten; dabei war man aber an bewohnte Plätze gebunden. Außerdem wurden - trotz ihrer hydraulischen Nachteile - die Brückenprofile bevorzugt, wo nicht nur das Anbringen der Pegellatten einfach war, sondern - da sie leicht erreichbar sind - auch die Abflußmessungen leichter durchgeführt werden konnten.

Mit der Zunahme der Wassernutzungen mußten immer kleinere Wasserläufe in den Beobachtungsbereich einbezogen werden, aber die Wahl der Pegelstellen erfolgte auch weiterhin nach den vorerwähnten Gesichtspunkten.

Die Stellen der wasserwirtschaftlichen Bauwerke fielen in den seltensten Fällen mit jenen der Pegelstationen zusammen. Seit der Jahrhundertwende wurde es also üblich, im Zusammenhang mit größeren Plänen, deren Verwirklichung mehrjähriger Vorbereitung bedarf, besondere Beobachtungsstellen zu errichten. Die Lage dieser Stationen wurde schon nach technischen Gesichtspunkten gewählt, da die Einrichtungskosten - z.B. Errichtung einer Mefibrücke in einem freien Profil - im Verhältnis zu den Kosten der geplanten Bauwerke kaum in die Waagschale fielen. Die fabriksmäßige Herstellung

von Registriergeräten und die Entwicklung der Verkehrsmittel hat die frühere Gebundenheit in der Auswahl der Beobachtungsstellen ebenfalls verringert.

Die Entwicklung der Wassernutzungen hat auch die Ausweitung der Beobachtungen auf andere Elemente erwünscht gemacht. Außer den Wasserstandsbeobachtungen und Abflußmessungen müssen auch qualitative Merkmale des Wassers gemessen werden. Wassertemperatur- und Schwebstoffmessungen wurden eingeleitet, später auch systematisch chemische und bakteriologische Untersuchungen vorgenommen. Die Entwicklung der Städte und die Industrialisierung haben in besonderem Maße zur Erweiterung der Grundwasserbeobachtungen beigetragen.

Heutzutage fordert die Planung der Wasservorratswirtschaft eine weitere Ausdehnung des Beobachtungsnetzes. Es genügt nicht mehr, die Lebenserscheinungen des natürlichen Gewässersystems zu erfassen. Die Beobachtungen müssen sich auch auf die Wassernutzungen erstrecken; auf die Wasserentnahmen und Abwasserzuleitungen, sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht. Ebenso muß man dem unterirdischen Wasser gesteigerte Aufmerksamkeit widmen [4]. Ohne Meßergebnisse kann man ja weder die Entwicklungstendenzen bestimmen, noch ist es möglich, die Bedarfsnormen nachzuprüfen. Ebensowenig läßt sich ohne Kenntnis der qualitativen Merkmale die zulässige Belastung unserer Gewässer bestimmen.

Die sprunghafte Zunahme der vom Hydrologen gewünschten Informationen drängen zur Automatisierung der Datenverarbeitung, was wiederum den Einsatz von Registrier- und Fernmeldegeräten erfordert. Besonders wichtig erscheint die ununterbrochene Beobachtung der Wasserentnahmen und Zuleitungen, da sie die Wasserführung des Hauptgewässers ganz unabhängig vom Wetterverlauf beeinflussen, sowie die laufende Messung der physikalischen und chemischen Merkmale, die sich fortwährend und zwischen weiten Grenzen ändern. Die zur automatischen Messung der wichtigsten Kennzeichen notwendigen Instrumente stehen bereits zur Verfügung [9, 11].

Der weitere Ausbau des Beobachtungsnetzes, die Erweiterung des Beobachtungskreises, sowie die Automatisierung der Beobachtungen ist natürlich nicht nur vom Standpunkt der Wasservorratswirtschaft aus gesehen wichtig. Ihre Vorteile werden sich auch auf dem operativen Gebiet der Wasserverwirtschaft fühlbar machen: Melde- und Vorhersagefristen erfahren beträchtliche Abkürzung.

Da zur Vorausbestimmung der für die Wasservorratswirtschaft nötigen Kennwerte möglichst lange Angabenreihen erwünscht sind, ist die Ausweitung der Beobachtungsnetze und die Erweiterung des Beobachtungsumfanges schon heute und auch dort aktuell, wo es von den planenden Ingenieuren noch nicht verlangt wird. Dies heißt nicht etwa, einer Mode-

bewegung blind nachzufolgen. Es handelt sich vielmehr um die Wahrnehmung unserer Pflichten und um die Suche nach den gewässerkundlich und finanziell optimalen Lösungen.

5. Vorschläge

Im Sinne meiner Ausführungen schlage ich vor, in das Programm der nächsten Vorhersage-Konferenz folgende Fragen aufzunehmen:

1. Bestimmung des Kreises jener gewässerkundlichen Beobachtungen, die für die Vorausbestimmung der von der Wasservorratswirtschaft geforderten Angaben notwendig sind,

2. Ausbau eines entsprechenden Beobachtungsnetzes,

3. Auswirkung der verschiedenen menschlichen Tätigkeiten auf die einzelnen Elemente des Wasserkreislaufes und Methoden zur Messung bzw. Abschätzung dieser Einflüsse,

4. Meinungsaustausch über Meßgeräte und Meßverfahren, die zur Bestimmung der für die Wasservorratswirtschaft wichtigsten gewässerkundlichen Elemente angewandt werden können,

5. Art der Datenverarbeitung und der Veröffentlichung der Angaben, die von der Wasservorratswirtschaft in Bezug auf die Oberflächengewässer (Flüsse und Seen) und auf das unterirdische Wasser (Bodenfeuchte, Grundwasser, Karstwasser, Schichtenwasser) in quantitativer oder qualitativer Hinsicht verlangt werden kann.

Die Zusammenarbeit der 8 Uferstaaten des Donauraumes auf dem Gebiet der Gewässerkunde wurde vom Koordinierungsrat der Internationalen Hydrologischen Dekade für beispielgebend erklärt. Die Befolgung meiner Vorschläge könnte den Hydrologen des Donauraumes in aller Welt erhöhtes Ansehen eintragen.

Schrifttum

- [1] Anderson P.W., Faust S.D., Zogorski J.S.: Analyses of longterm trends in water-quality parameters. Proceedings of the 4th American Water Resources Conference, AWRA, Urbana, III. 1968. pp. 123-131.
- [2] Boudot A.: Utilisation de l'eau à "USINOR-DUN-KERQUE" SHF, XI^{mes} Journées de l'Hydraulique, Paris, 1970. Question I. Rapport 10.
- [3] Csallany S.C.: Planning water for 2000 A.D. Proceedings of the 4th American Water Resources Conference, AWRA, Urbana, III. 1968. pp. 159-174.
- [4] Csermák B.: Hydrological and related data collection with regard to the requirement of water resources management. Symposium on Design of Hydrological Networks, Quebec, 1965. IASH, Publ. no. 68. pp. 597-602.
- [5] Csermák B., Lászlóffy W.: Les problèmes hydrologiques des utilisations d'eau. Assemblée Générale de Berne, 1967. IASH. Publ. no. 76. pp. 15-21.
- [6] Jacquet J., Gras R.: Les échanges d'énergie en jeu entre un plan d'eau et l'atmosphère; détermination de la capacité de réfrigération d'un plan d'eau. SHF, XI^{mes} Journées de l'Hydraulique, Paris, 1970. Question IV. Rapport 12.
- [7] Koch K.H.: L'eau, facteur économique en sidérurgie. Bulletin GEDEAU, Liège, No. 45. 1959/III. pp. 154-159.
- [8] Lwowitsch M.I.: Vodnie resursi buduschtschego. Moskva, 1969.
- [9] Malz F., Schniewind M., Krone R.: About practical experience with devices to measure O₂, turbidity, solid matter contents and electrical conductivity within the control of watercourses UNESCO-IASH Symposium on Hydrometry, Koblenz, 1970, Paper 62.
- [10] Rainwater F.H.: Research in thermal pollution-control. Proceedings of the 4th American Water Resources Conference, AWRA, Urbana, III. 1968. pp. 140-145.
- [11] Smoot G.F.: Water quality monitoring and data transmission. UNESCO-IASH Symposium on Hydrometry, Koblenz, 1970. Paper 73.
- [12] Tylko J., Poszwa E., Filipowski A.: -Potrzeby wodne kraju i bilanse wodnogospodarcze. Gospodarka Wodna, Warszawa, 1965/8-9. pp. 301-306.
- [13] U.S. Water Resources Council: The Nations water resources. Summary report. Washington, D.C. 1968

HYDRAULIC APPROACH TO THE SOLUTION OF SHORT-TERM
FORECASTS ON THE DANUBE RIVER

DRAGAN ANDREJEVIC, NENAD COLJENSIC,
SFRY

P r e s s m e

Почти все методы краткосрочных прогнозов, уровней или расходов больших водотоков могут быть сведены в две большие группы: детерминистическую и стохастическую.

В первую группу входят методы, основанные на анализе генезиса формирования стока и движения воды в открытых руслах, т.е. на упрощенных способах интерпретации таких законов.

Для второй группы характерен статистический анализ данных об уровнях и расходах воды.

Основной идеей настоящей работы является стремление показать, что гидравлический метод, основанный на законах неуставновившегося движения¹⁾ в своей упрощенной форме уже содержит некоторые из существенных элементов статистического метода предсказания, как например, соответствие, эргодичность и тенденции.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Naheru alle Methoden kurzfristiger Vorhersagen für den Wasserstand oder Abfluß großer Wasserläufe können in zwei große Gruppen zusammengefaßt werden: deterministische und stocheastische.

Zur ersten Gruppe gehören die Methoden, die sich auf die Analyse der Entstehung eines Abflusses und der Bewegung des Wassers im offenen Flußbett, d.h. auf vereinfachte Arten der Interpretation solcher Gesetze gründen.

Für die zweite Gruppe ist die statistische Analyse der Angaben über Wasserstand und Abfluß charakteristisch.

Die Grundidee dieser Arbeit ist das Bestreben, zu zeigen, daß die hydraulische Methode, die auf den Gesetzen des instationären Ablusses basiert,

bereits in ihrer vereinfachten Form einige der wesentlichen Elemente der statistischen Methode einer Vorhersage enthält, so z.B. die Übereinstimmung, die Gesetzmäßigkeit und die Tendenz.

S u m m a r y

Almost all methods of treatment and approaches to the solution of short-term forecasts of the water levels or flows in the large rivers can be classified into two big groups: deterministic and stochastic.

The deterministic group is grounded on the laws of genesis and movements of water in the open water flows, i.e. it is based on the simplified solutions of these laws.

The stochastic group of short-term forecasts is characterised by a statistic analysis of the principal hydrological magnitudes of water levels and flows.

The conceptual idea of the present work was to show that a hydraulic method, based on the laws governing the irregular water flows, presented in a simplified form, contains in itself certain most essential elements of stochastic method of approaches to the forecasts such as the correspondence ergodicity and tendency.

General Equations

The movement of water in the open natural courses is presented, in addition to certain assumptions, in the partial differential equations:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{q} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{q} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V^2}{CR} = 0 \quad (1)$$

$$F \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial F}{\partial x} + B \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

where:

- H - level of water surface
- V - velocity
- F - cross-sectional area of the flow
- B - width of the flow profile
- C - Chezy's resistance factor
- R - hydraulic radius
- g - gravity acceleration
- x - distance along the river
- t - time

Solutions to equations (1) and (2), under the new assumption can also result in the mathematical theoretical expressions of the characteristics of flood wave movements along the river bed (wave propagation velocity, flattening of wave, etc.).

However, such expressions involve high complexity, hence their application restricted.

If the dynamic influences are neglected in equation (1) and only equation of continuity (2) is used, several methods of flood routing are developed.

When replacing the derivations by the finite differences and when neglecting the dynamic influences the assumptions are introduced, that the volume of water in a finite section of the river is of a single-meaning function of discharge in its downstream profile, and that the time interval required for determination of the variable reaches such an extent that the hydrograph can be approximated with a straight.

Thus, the problem is reduced to determination of the relationship between water level, discharge and storage. By introducing the notions of the prism and wedge storage, the expression is obtained for the total storage of a section of the river.

$$S = KO + KX(1 - O) \quad (3)$$

where:

S - total amount of water stored

I - inflow, and

O - outflow from the river section.

Equation (3) is known as the Muskingum equation. When the change of storage in the selected time interval is introduced in equation (3), the equation of coefficient method is obtained:

$$O_{t+2} - O_{t+1} = C_1(I_{t+1} - O_{t+1}) + C_2(I_{t+2} - I_{t+1}) \quad (4)$$

where:

$$C_1 = \frac{\Delta t}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (5)$$

and

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{2} - KX}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (6)$$

The equation in the form given above does not contain the forecasting element, so that it can not be directly used in operative forecasts.

Adaptation of Equations to the Requirements of Forecasts

Introduction of forecasting element into equation (4) is made possible in such a way that members $I_{t+2} - I_{t+1}$, according to the method of tendency, can be expressed in function of the preceding changes. For that purpose, one can use the simple autoregressive model or Markoff's chain of the first order.

$$X_{t+1} = r X_t + \varepsilon(y)_t \quad (7)$$

If variable is substituted by the inflow increment in the considered section $\Delta I = I_{t+1} - I_t$ the following equation will be obtained:

$$I_{t+2} - I_{t+1} = r(I_{t+1} - I_t) + \varepsilon(y)_t \quad (8)$$

When equation (8) is introduced in equation (4) the following expression is obtained:

$$O_{t+2} - O_{t+1} = C_1(I_{t+1} - O_{t+1}) + C_2(I_{t+2} - I_t) + \varepsilon'(y)_t \quad (9)$$

where:

$\varepsilon'(y)$ - random discharge component representing a part of indispensably erroneous forecast
 (C_2) - the coefficient which implicitly comprises in itself the coefficient of Markoff's chain (r).

Since coefficient (r) is not particularly defined, coefficients (C_2) and (C_1) are determined by fitting the inferred mathematical model to the available hydrological data.

If the storage is expressed in function of outflow from the certain section of the river, the dependence in the form of loop will result.

The existence of loop indicates that the magnitude of storage is a function of the inflow which can be mathematically presented by an approximate equality:

$$S = XI + (1-X) O \quad (10)$$

Alteration of value of parameter (X) will result in the loop which will have different widths. The value which results in the narrowest loop represents the real value of parameter (X) for the determined section of the river.

Coefficients (K) and (X), defined in such a way have not merely physical meaning because the starting inferred mathematical model makes certain actual elements such as difference in wave travel time, incorrectness of discharge curves, etc. negligible. As a consequence of such a simplification of the problem, i.e. the application of method of fitting the obtained values for (K) and (X) involve partial influences of other parameters which are neglected at a starting point.

If the partial analysis is given to equation (9), the sight will be caught of the similarity of its members to the most substantial elements of the stochastic method of approach to the problem of forecasts.

Thus, member $I_{t+1} - O_{t+1}$ represents the dependence of the future alterations upon the spacial conditions, i.e. it represents the principle of ergodicity. Member $I_{t+1} - I_t$ defines the correspondence, i.e. it defines the future alterations which are dependant upon the alterations in space which occurred in precedence of the former ones. Both members together comprise the tendency expressed through coefficients (C_1) and $(C_2)(C'_2)$.

From the above considerations the conclusion can be made that the hydraulic approach to the problem of short-term forecast in its simplified form as presented in this report, comprises in itself the most substantial principles of stochastic method of forecasting, i.e. the correspondence, tendency and ergodicity.

Establishement of the mathematical model of forecast on the basis of equation (9) and its fitting on the observed and measured data for each individual section of the river, gives a definition of magnitudes of storage coefficient (K) and parameter (X), i.e. gives the explanation of coefficients (C_1) and $(C_2)(C'_2)$.

The coefficients defined in such a way illustrate the importance and magnitude of individual members of forecast model, and make known the extent of applicability of stochastic principles which are commonly used in the forecasts such as correspondence, ergodicity and tendency.

The above described procedure has been applied in construction of the mathematical model of short-term forecasts of water inflow into the storage reservoir of the Djerdap hydropower plant on the Danube river.

Solutions to the Short-Term Forecasts for Djerdap Hydropower Plant on the Danube River

The solution to the problem of short-term forecasts on the Danube river covering the period of not more than six days, assumes in advance the comprehensive analysis of hydrological data recorded for the large river flows within the area which can cover the proposed period of forecasting.

The wave travel time is the basic element which defines the zone of the river affecting the formation of discharge in some downstream point in a certain period of time to follow. It practically means the definition of lines of equal wave travel times. These lines can not be distinctively determined since the notion "the wave travel time" itself is not clearly defined. This time depends on many parameters and its mathematical definition for the natural conditions can not be easily determined.

For these reasons certain average times of wave crest travel have been adopted as recognized ones. In this way, we are well aware of the error which is done due to difference in wave travel time at various water levels, forms of waves etc.

The times of travel of waves defined in this way are taken as a basis for delineation of the lines of equal wave travel times, drawn in layout plan (fig. 2.).

The flattening of wave has also been analyzed in all river flows covered by the forecast. This flattening is different for various sections of the river and for various magnitudes of waves and represents the function of many parameters. The most important parameters are geometric and hydraulic characteristics flow, character and form of waves, etc.

The capacities of storages, i.e. the flattening of waves are defined on the basis of the available hydrological data and on the basis of balance of waters per individual calculated sections of the river.

The entire field of the forecast has been divided into sections whose lengths are approximately equal to the travel of the flood wave passed in one day time, so called calculated section.

Determination of parameters (K) and (X) is made by balance of several waves whose inflow and outflow discharges are known, the storage being determined as the difference between the inflow and outflow discharge. This procedure has been applied for each section separately, in determining the storage curve (K) and parameter (X).

The entrance to the Djerdap reservoir, i.e. the end of back water depends upon the natural discharge of the Danube river and it ranges between the towns of Novi Sad and Veliko Gradiste.

The mathematical model of the forecast is constructed in such a way that it provides the successive forecast for each individual profile. The profile at the town of Veliko Gradiste has been taken as the most downstream profile and, according to the accepted time scheme it means that for the purpose of releasing the short-term forecasts covering the period of not more than six days, the data collected at the network of water gauge stations reaching the upstream profiles which are sufficiently distant away at the main river flows should be taken into consideration, such as:

- at the Danube river - Budapest
- at the Sava river - Crnac
- at the Drava river - Botovo
- at the Tisza river - Segedin

Equation (9) represents the basis of the mathematical model of forecast.

In the mathematical model, this equation is represented in the following form:

$$O_K^{t+i} = O_K^{t+i-1} + A_K^{t+i-1} (I_K^{t+i-1} - O_K^{t+i-1}) + B_K^{t+i-1} (I_K^{t+i-1} - I_K^{t+i-2}) \quad (11)$$

where (t) denotes the date of release of the forecast, i.e. this is the zero day of the forecast.

Index (1) denotes the days of forecast ranging from 1 to 6, (K) represents the symbol of the section, while (A) and (B) are in fact the coefficients (C_1) and (C_2).

There are nine sections altogether on which equation (11) has been applied. Six of them are on the Danube river, while the other three refer to the Sava river. The application of equation (11) on the other river flows covered by the forecast field would not contribute to any considerable improvement of the results of forecast. The reasons for this presumption are manyfold. The natural regime of flow in the Drina and Drava rivers is disturbed to a considerable extent owing to existence of many storage reservoirs on these rivers.

The Velika Morava river is characterized by very well defined instability of discharge curves, while the Tisza river is affected by the back water from its confluence with the Danube river. The length of back water is subject to variations and depends upon the conditions prevailing in the Danube and the Tisza river catchment areas.

At some rivers, the boundaries of the forecast field are extended to small tributaries so that the number of water gauge stations to be taken into consideration for observations should be increased.

Taking into consideration all the comments set

forth above, the network of the gauging stations shown in table 1 has been adopted, the mathematical model of forecast and the corresponding programme for electronic computer being prepared accordingly.

The input data for electronic computer are given in table 1.

Symbols $t-3$ to $t-5$ designate the dates in which symbol t denotes the zero day of forecast, meaning that the forecast is about to begin as from that day.

As shown above, only 17 stations are entered directly in the table of input data. The data on the discharges collected at these stations from the columns $t-1$ and t , columns $t-3$ and $t-2$ being introduced for the town of Senta.

The input data in table 1 for columns $t+1$ to $t+5$ at water gauging stations from 11 to 17 are formed through the mediation of the short term-forecast programmes, i.e. by the correspondence with the upstream stations.

On the basis of the described model, the electronic computer will give the results of the forecasts for the gauging stations and for the various periods of forecasts (table 2).

As shown above and according to that programme, the forecast can be obtained for all nine profiles at the same time.

Fig. 3 gives the graphic presentation a series of waves which are used in checking the forecast model. The relative errors of forecasts are given in fig. 4 for Veliko Gradiste profile. The average relative error for the shown wave amounts to 1.6 % for the first day, 2.2 % for the second day, 2.5 % for the third day, 2.7 % for the fourth day, 3.1 % for the fifth day and 3.8 % for the sixth day.

Among the amount of waves analyzed, the wave shown on the figure belongs to the group of waves whose deviations from the forecast can be classified into average.

The accuracy of the forecast has been verified on the great number of waves and the results of these observations indicate that the average errors in the case of forecasts covering the period of one, two and three days in advance do not exceed the values of 2 %, 2.5 % and 3.5 % respectively.

The order of magnitude of the errors on other profiles upstream from Veliko Gradiste is ranging within similar limits.

From time to time the errors surpass the above mentioned average values, the reasons for that being the most frequently found in the erroneous data or in occurrence of flood waves, on some small water flows which are not included in the forecast model.

R E F E R E N C E S

1. HUNTER ROUSE: ENGINEERING HYDRAULICS, NEW YORK 1949.
2. VEN TE CHOW: HANDBOOK OF APPLIED HYDROLOGY, NEW YORK 1964.
3. INTER-REGIONAL TRAINING SEMINAR ON HYDROLOGIC FORECASTING AND THE WATER BALANCE (FINAL REPORT), WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, BELGRADE 1958.
4. LINSLEY, KOHLER, PAULHUS: HYDROLOGY FOR ENGINEERS, NEW YORK 1958.
5. LINSLEY, KOHLER, PAULHUS: APPLIED HYDROLOGY, NEW YORK 1949.
6. APOLOV, KALININ, KOMAROV: GIDROLOGICHESKE PROGNOZI, LENINGRAD 1960.
7. BEFANI, KALININ: UPRAZNENIJA I METODICHESKIE RAZRABOTKI PO GIDROLOGICHESKIM PROGNOZAM, LENINGRAD 1965.
8. E.G. POPOV: GIDROLOGICHESKIE PROGNOZI, LENINGRAD 1957.
9. M. MELENTIJEVIC: MATEMATICKI MODELI ZA VREMENSKE REDOVE RECNIH PROCICAJA DUNAVA, BEOGRAD 1970

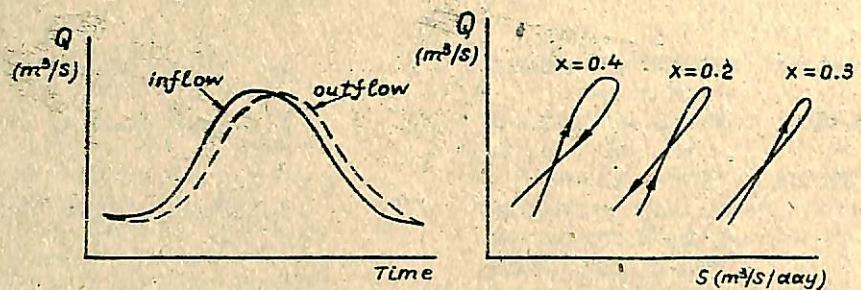


Fig. 1

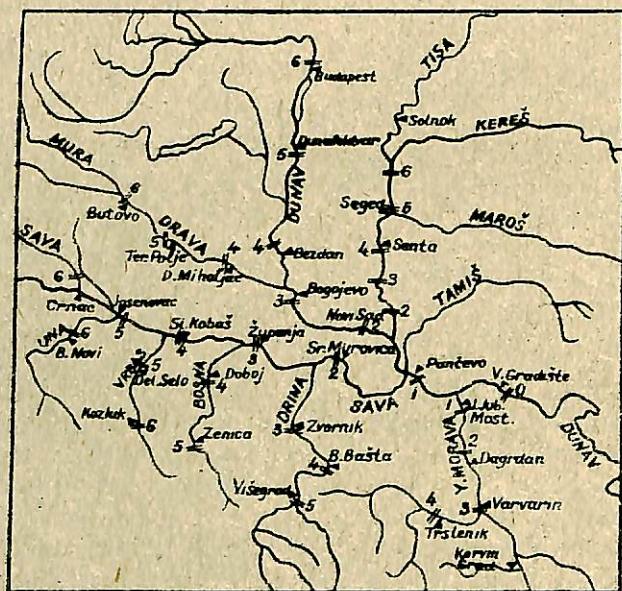


Fig. 2

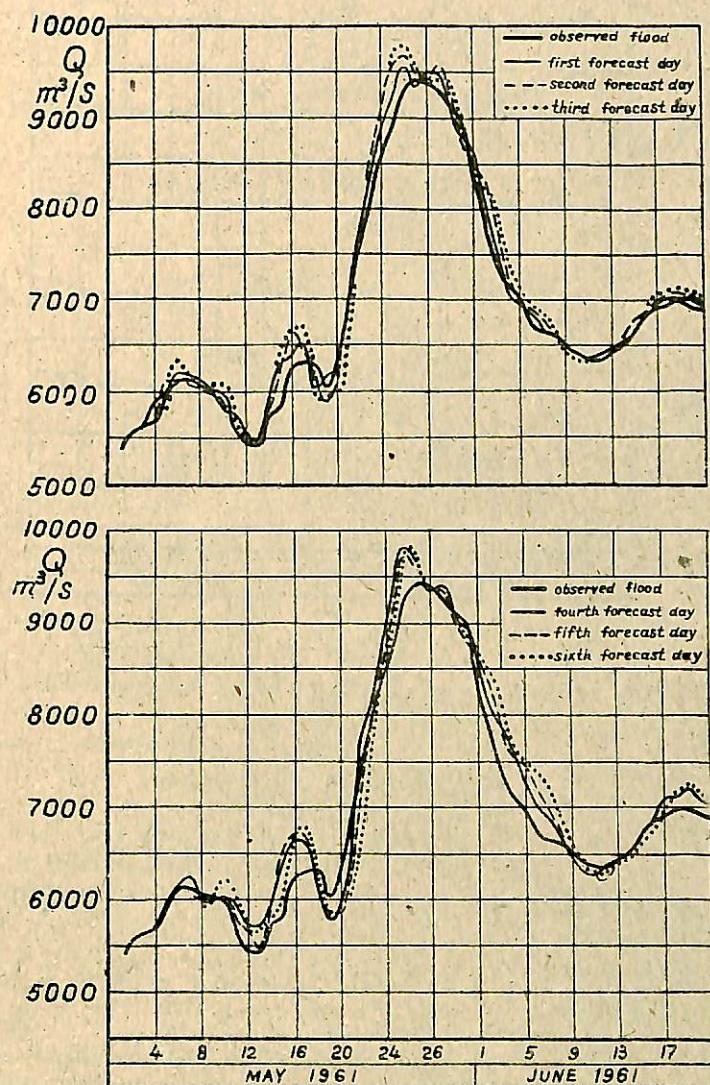


Fig. 3

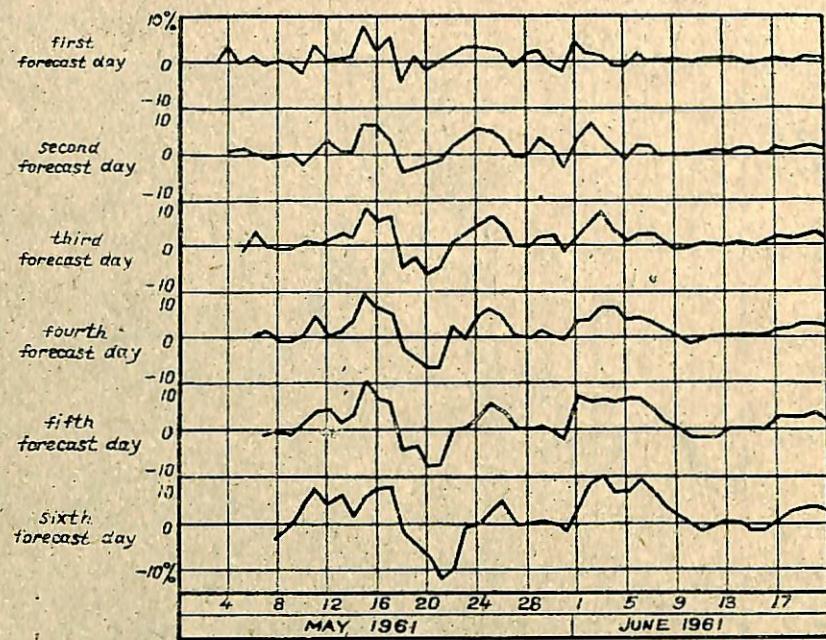


Fig. 4

APPLICATION OF AN AUTOREGRESSIVE MODEL FOR FORECASTING AND SIMULATING DAILY DISCHARGE

M. ČABRIĆ, B. DJORDJEVIĆ, S. JOVANOVIC,

"Jaroslav Černi" Institute for Development
of Water Resources, Beograd, SFRY

Р е з и м е

На основании надежного ряда гидрологических данных о расходах воды Дуная, в створе водомерного поста Оршава, разработана авторегрессионная модель, основанная трактовкой суточных расходов как сложной цепи Маркова.

Эту математическую модель можно использовать двояко:

1. Для прогноза суточных расходов на Дунай на десять дней вперед;
2. Для моделирования рядов суточных расходов с использованием метода Монте-Карло.

В статье даны оба способа использования этой математической модели. Испытание модели проведено на некоторых других водотоках Югославии, в результате чего получены очень хорошие результаты. Моделированием суточных расходов можно получить искусственный ряд неограниченной длины, необходимый для водохозяйственных расчетов.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Auf der Grundlage einer zuverlässigen Reihe hydrologischer Daten über Abflüsse der Donau wurde für das Pegelprofil Oršava ein auf die Behandlung von Tagesabflüssen sowie der zusammengesetzten Markow'schen Kette ausgerichtetes Autoregressivmodell erarbeitet.

Das besagte mathematische Modell kann in zweifacher Weise angewendet werden:

1. Für die Vorhersage von Tagesabflüssen der Donau für 10 Tage voraus;
2. Für die Modellierung von Reihen von Tagesabflüssen bei Verwendung der Monte-Carlo-Methode.

Es werden beide Arten der Verwendung dieses mathematischen Modells angeführt. Die Überprüfung

dieses Modells wurde an einigen Wasserläufen Jugoslawiens vorgenommen und hat sehr gute Ergebnisse erzielt. Durch Modellierung von Tagesabflüssen kann man eine künstliche Reihe unbegrenzter Länge erhalten, die für wasserwirtschaftliche Berechnungen notwendig ist.

S u m m a r y

On the basis of extensive and reliable hydrologic data on discharge of the Danube at Oršava, an autoregressive model has been produced, based on the treatment of daily discharge values as a complex Markoff chain. The application of this mathematical model is possible in two ways.

1. For forecasting daily discharge of the Danube for several days in advance.
2. For simulating series of discharge values using the Monte Carlo method.

In this paper both applications of the model are presented. The model has also been tested on other watercourses in Yugoslavia and it has given very good results. By simulating daily discharge, a synthetic series of unlimited length may be obtained, which is very useful for hydrotechnical calculations.

1. Introduction

At present, statistical analysis of time series is commonly in use as a basis for insight into the characteristics of observed hydrologic series as well as for simulating new synthetic series. However, these analyses, particularly the simulation of synthetic series, have most often include cer-

tain mean discharge values (annual, eventually monthly). Statistical analysis of daily discharge, and particularly simulating and synthetic prolongation of such series, have not so often been treated in contemporary literature. For this reason the authors have concentrated on this problem, with the task to produce an autoregressive model for a series of daily discharge values, which would be applicable for short-term, and even further forecasting, as well as for simulating synthetic series of daily discharge.

The model considered here is based on the analysis of the internal structure of a series of daily discharge values, treating the series as a complex Markovian process. Essentially, the model is based on the distribution of two components which influence the discharge value at a certain moment: the autoregressive component which defines the "inertia" of the process and stochastic component.

Such an autoregressive model may be applied in two ways: for forecasting daily discharge for 10-20 days in advance (which depends on the power of the autocorrelational relation) and for simulating synthetic series of daily discharge of unlimited length. In this article the construction of a mathematical model is presented first, and the possibilities of its application for forecasting and simulating are analyzed separately.

2. The Mathematical Model of a Series of Daily Discharge.

The model is constructed on the basis of a recorded series of daily discharge, obtained through many years of hydrologic observations at a certain water-gauging station. Having at our disposal data on a realised series of daily discharge, it is possible to establish a relation between the discharge on j day and the discharge on preceding days $j-1, j-2, \dots, j-N$ of the following form:

$$X_j = a_0 + a_1 X_{j-1} + a_2 X_{j-2} + \dots + a_N X_{j-N} + e_j \quad (1)$$

where: X_j - represents the logarithm of the discharge value Q_j .

By this relation the discharge value Q_j (through its logarithm, X_j) is presented as the result of two components:

1. A deterministic component representing the "inertia" of the hydrologic phenomenon (the first $N+1$ elements in relation (1)).
2. A stochastic component e_j due to random events which have taken place in the period of time comprised in relation (1).

It must be noted that the stochastic component is determined by the interaction of a large number of physical and geophysical phenomena (rainfall,

temperature, etc.) which practically could never be completely defined by a model.

Generally, it would be possible to extend the model by taking into account at least of these influences (for example, preceding rainfall P , temperature T ...). Then the relation would be of the following form:

$$X_j = a_0 + a_1 X_{j-1} + \dots + b_1 P_{j-1} + b_2 P_{j-2} + \dots + C_1 T_{j-1} + C_2 T_{j-2} + \dots + e_j$$

In this work we shall limit ourselves to a model based only on recorded daily discharge, as this seems to be a justified scheme for a large river, such as the Danube. In the case of a smaller river, the model should obviously be extended by taking into account the recorded rainfall in the watershed.

Similarly to relation (1), it is possible to give a relation between the discharge on $j+k$ day and the discharge on days $j-1, j-2, \dots, j-N$:

$$X_{j+k} = a_0 + a_1 X_{j-1} + a_2 X_{j-2} + \dots + a_N X_{j-N} + e_{j+k} \quad (2)$$

$K = 0, 1, 2, \dots, M.$

The autoregression coefficients are obtained from the matrix of autocorrelation coefficients of the series, which is defined by

$$r_N = \frac{\text{Cov}(X_i, X_{i+N})}{\text{Var } X_i}$$

As the autocorrelation coefficient of the series of daily discharge depends on the general discharge regime of the watercourse (for example, the "inertia" of the phenomenon of a low-water period differs from that of a high-water period), in the case of the Danube the year has been divided into three separate periods: 1. February to April. 2. May to September, and 3. October to January. The modelling has been performed separately for each of these periods, thus assuming that the mentioned relationships of the model remain constant within these periods. Evidently, the usual water regime may not be alike from one year to another. However it is our experience that shorter periods of time would not contribute to the accuracy of the model.

The model is based on a record of daily discharge at Orsava water-gauging station, for the period of 1957-1968 (a total of 4383 data items). The computations were performed on an IBM 360/44 computer.

By analyzing the correlation of the discharge on the j day with that of the days $j-1, j-2, j-3$, etc., it can be noted that the autocorrelation coefficient shows a rapid decrease as the distance between the correlated values becomes greater. On the contrary, the coefficient of multiple correlation increases with N , when successive correlations are performed according to relation (1).

These calculations have been performed for each of the three separate reasons. Figure 1 represents

the variation of the autocorrelation coefficients, computed for each season. It is noticeable that this relation is poorer in spring than in other two periods, which is a natural consequence of the water regime in these periods.

On the basis of logarithms of the recorded daily discharge values, autocovariances have been computed for lags $j=1-10$.

$$R_j = \frac{1}{n-j+1} \sum_{i=1}^{n-j+1} (X_i - \bar{X})(X_{i+j-1} - \bar{X})$$

where

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

and n represents the length of the series.

Assuming the equality of variances in each of the analyzed cases (this was possible due to a large number of data items, and was also confirmed by control computations), the corresponding autocorrelation coefficients were computed in the following manner:

$$r_j = \frac{R_j}{S^2}$$

where

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum (X_i - \bar{X})^2$$

The analysis of the autocorrelation coefficients leads to a following conclusion: the increase of the multiple correlation coefficient with the increase of N indicates that the series has the characteristics of a complex Markoff chain which must be taken into account when constructing the model. Figure 2 represents the multiple correlation coefficient R_j for various values of N and K (notations as in relation 2). Figure 3 represents the dependence of the multiple correlation coefficient on the season, for three values of K ($K=1, 5$ and 10). It can be noted that the increase of R_j is at first rapid and then becomes slower, to reach a maximum value approximately for $N = 10$. According to these results, for further analysis the value $N = 10$ was accepted. In Fig. 3 it can be noted that, as in Fig. 1, the autocorrelation of the series is poorer in the period of February to April than in other seasons.

Having set the value $N = 10$, it was possible to determine the regressive part of relation (2) as well as the residual value e_{j+k} for each chosen value of K . Calculations were performed for values of K from 0 to 9 (that is, forecasting for 10 days in advance). On the basis of the recorded series of daily discharge, the empirical distribution of the random variable e_{j+k} was determined for each season and for each value of $K = 0, 1, 2, 3, \dots, 9$. A marked asymmetry of these distribution functions may be noted owing to the fact that the growth of the discharge value is commonly steeper than the decrease.

3. Application of the model to forecasting discharge.

Having completed the analysis of multiple correlation in the recorded series of daily discharge and having set the optimum number of initial values (n) which should serve as a basis for prediction, in the step the coefficients of regression were computed for the following series of equations:

$$\ln Q_j = a_0 + a_{1j} \ln Q_{j-1} + a_{2j} \ln Q_{j-2} + \dots + a_{nj} \ln Q_{j-N} + e_j$$

$$\ln Q_{j+1} = a_0 + a_{1(j+1)} \ln Q_{j-1} + \dots + a_{N(j+1)} \ln Q_{j-N} + e_{j+1}$$

$$\ln Q_{j+M} = a_0 + a_{1(j+M)} \ln Q_{j-1} + \dots + a_{N(j+M)} \ln Q_{j-N} + e_{j+M}$$

The computation of regression coefficients was performed in the following manner: on the basis of the calculated autocorrelation coefficients and considering the $j+k$ day ($k = 0, 1, \dots, M$) as dependent variable Y and the days $j-1$ to $j-N$ as independent variables X_i

$$a_{NY} = \left(\sum_{i=1}^N r_{iy} r_{in}^{-1} \right) S_y / S_n$$

where

r_{iy} - the intercorrelation of the i -th independent variable with the dependent variable

r_{in} - the intercorrelation of the i -th and the n -th independent variables.

The interception is found by the following equation:

$$a_0 Y = Y - \sum_{i=1}^N a_{iy} X_i$$

Using the regression equations, values corresponding to each recorded values a series of residual values was obtained. As this series of residual values was long enough, we did not attempt the task of fitting a theoretical distribution function to the residual data, but we limited our further work to the use of empirical distribution function. (It was noted earlier that these distribution functions show a marked asymmetry, which is a consequence of the nature of the phenomenon.)

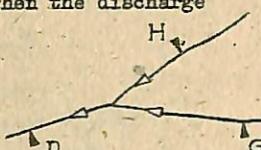
Using the empirical distribution functions of the residual values it was possible to determine values of the random residual corresponding to the probability of 0.50 and 0.95 for each day to be predicted. In this way, by adding (or subtracting) the value of the random residual to the predicted value of discharge, a confidence interval of 90 % was obtained for the predicted discharge.

Having determined all these elements, the procedure of forecasting discharge values becomes very simple. Figure 4 represents the flow diagram of the computer program by which this final computation was achieved.

Figures 5 and 6 show examples of forecasting discharge values for 10 days in advance. Using the model and recorded discharge values for 10 days ($j-1, \dots, j-10$) discharge values for 10 days in advance were forecasted and a confidence interval of 90 % was determined (5 % - 95 %). It may be no-

ticed that the computed discharge values conform very well to the recorded values.

Currently, work is being done on the improvement of the model by taking into account the analysis of discharge upstream from the considered water-gauging station. Supposing a scheme as on our sketch, forecasting is performed for discharge at point D. Then the discharge



value for the day $j+k$ may be defined by the following relation:

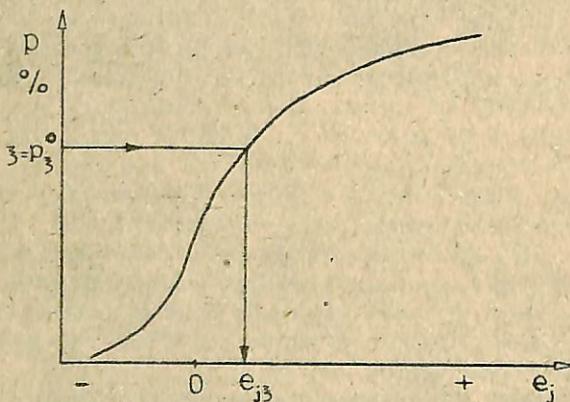
$$X_{j+k}^D = a_0 + a_1 X_{j-1}^D + a_2 X_{j-2}^D + \dots + b_1 X_{j-1}^G + b_2 X_{j-2}^G + \dots + c_1 X_{j-1}^H + c_2 X_{j-2}^H + \dots + e_{j+k}$$

Such a model is more "flexible" and more convenient for forecasting, particularly for cases of marked unstationary flow of a watercourse.

4. Application for simulation of series of daily discharge.

Having defined the structure of the phenomenon by the model, it is possible to simulate daily discharge and produce synthetic series of unlimited length. For simulation relation (1) was used with the value of $N = 10$.

Starting from a certain recorded series of discharge values $Q_{j-1}, Q_{j-2}, \dots, Q_{j-10}$, the value of Q_j due to "inertia" is obtained from the regression equation (1). The stochastic component e_j is determined by a method of random choice, using the empirical distribution function $e_j = f(p)$ and generating random numbers (see figure below).



The value of the random residual is generated in the following manner. A uniformly distributed random number belonging to the interval $(0,1)$ was generated, using a subroutine for a random number generation (IBM Scientific Subroutine Package). This number, taken as the probability of the resi-

dual value e_j , was used to read the value of this residual from the inverse of its empirical distribution function. This procedure is cyclic. Each output of the random number generating subroutine produces also the input for the next run. The subroutine used in our program is specific for the system IBM 360 and will produce 2^{29} terms before repeating.

After having produced a simulated value Q_j , by adding the regressive and stochastic components, the chronologically oldest and least significant data item in the regression equation (Q_{j-10}) is left off and the computation is repeated thus producing Q_{j+1} on the basis of a new series $Q_j, Q_{j-1}, \dots, Q_{j-9}$.

In this way, by connecting the model for all three seasons which have been analyzed separately, a synthetic series of daily discharge of unlimited length may be obtained. The regression equation and the distribution function of the residuals have been replaced each time a passage was made from one season to another, while the process of random number generation was not interrupted. Figure 8 represents one of the realisations of the simulated series of daily discharge for one year.

In this way, by simulating series using the Monte Carlo method, additional information is obtained about the possible realisation of discharge treated as a complex Markovian process. It should not be understood that this synthetic series improves degree of accuracy of hydrological information, but this method enables to obtain detailed information on the possible water regime of the watercourse on the basis of the observed sample.

Conclusion.

The suggested autoregressive model of a series of daily discharge makes successful forecasting for 10 days in advance possible, as well as simulating a series of daily discharge of unlimited length. Work is being done on the improvement of the model by extending the analysis of autoregression by taking into account hydrologic parameters of upstream water-gauging stations.

R E F E R E N C E S

1. Cabric M., B. Djordjevic. A statistical model applicable to a hydrological phenomenon. 1970 Yugoslav International Symposium on the Information Processing 6 th.
2. Duband D. La correlation en chaine des debits journaliers, EDF, DTG, 1968.
3. Chambers J.M. Computers in Statistical Research Simulation and Computer-Aided Mathematics. Technometrics, February, 1970 v12
4. Manning R.W. Numerical Methods for Scientists and Engineers Hill, New York, 1962.

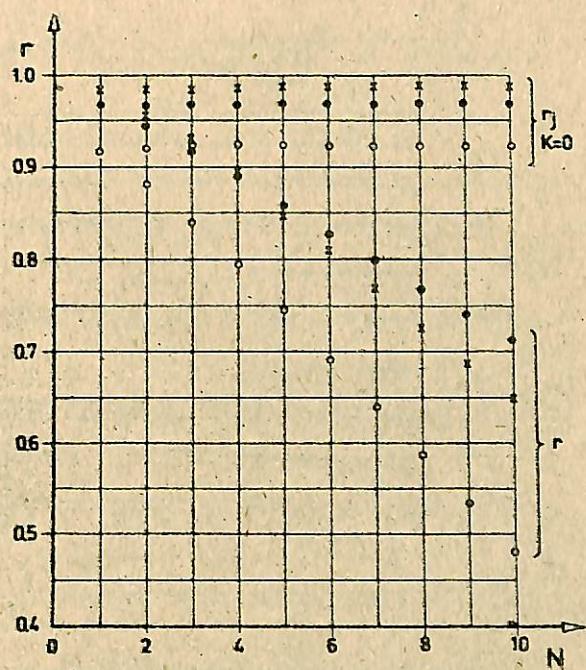


FIG.1 - THE AUTOCORRELATION COEFFICIENT IN DEPENDENCE OF LAG BETWEEN CORRELATED DAILY DISCHARGE VALUES

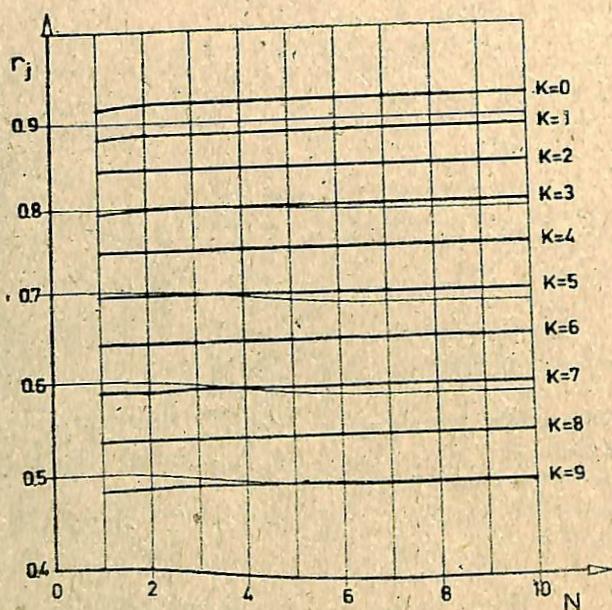


FIG. 2 - THE AUTOCORRELATION COEFFICIENT AS A
FUNCTION OF THE LENGTH OF THE OBSERVED PER-
IOD N AND THE LAG BETWEEN CORRELATED
VALUES K

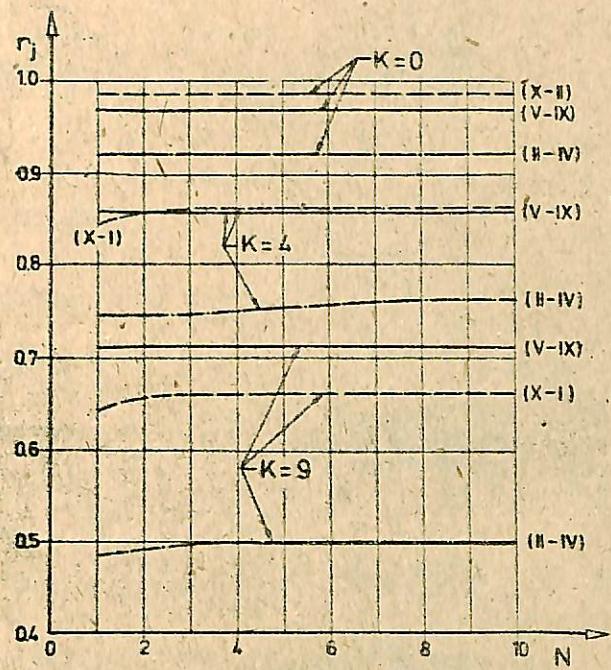


FIG. 3 - CHANGES OF THE AUTOCORRELATION COEFFICIENT FOR $K=0, 4$ AND 9 DEPENDING ON THE SEASON

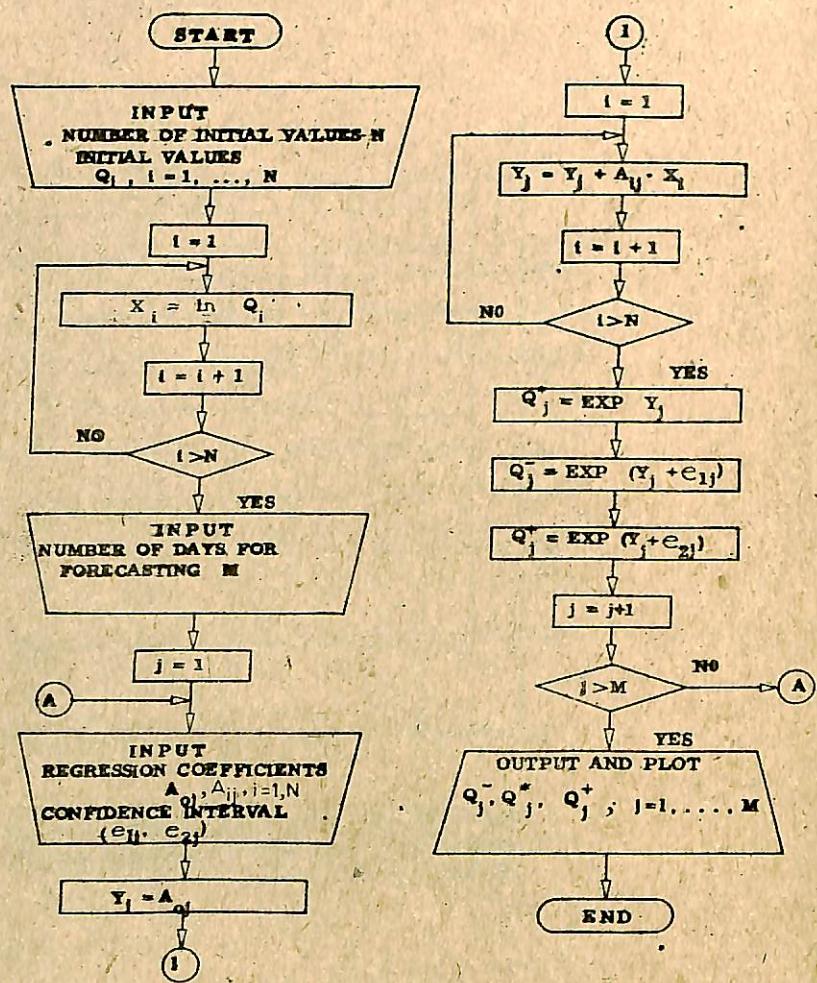


Fig. 4
FLOW DIAGRAM OF PROGRAM FOR FORECASTING

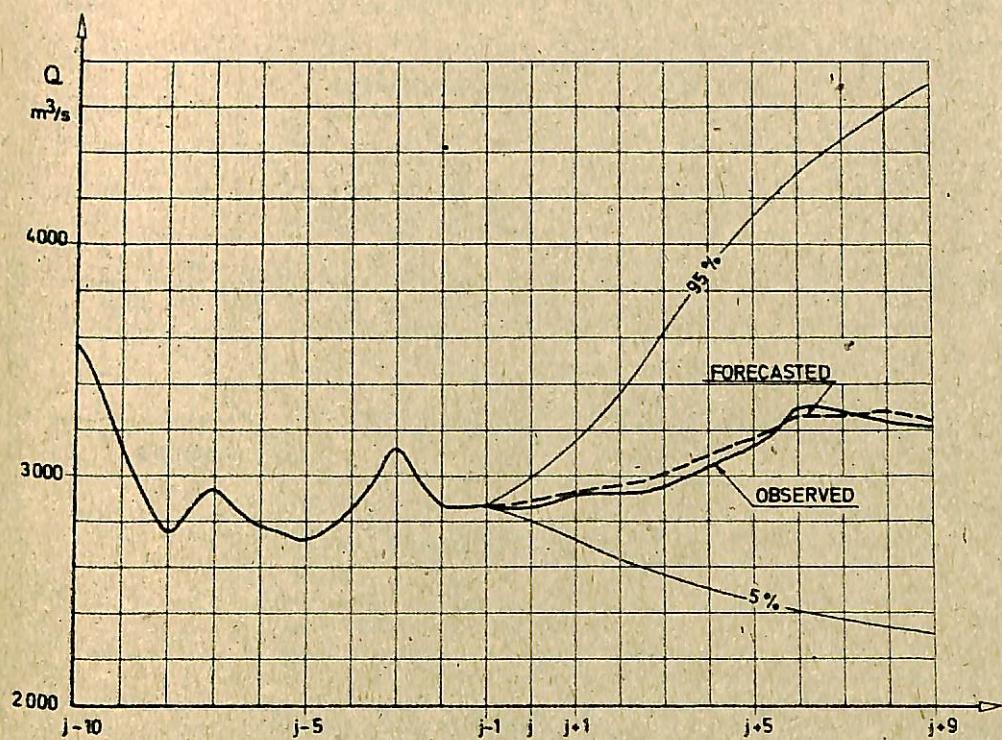


FIG. 5 - FORECASTED AND OBSERVED VALUES OF DAILY
DISCHARGE WITH A CONFIDENCE INTERVAL OF 90 %

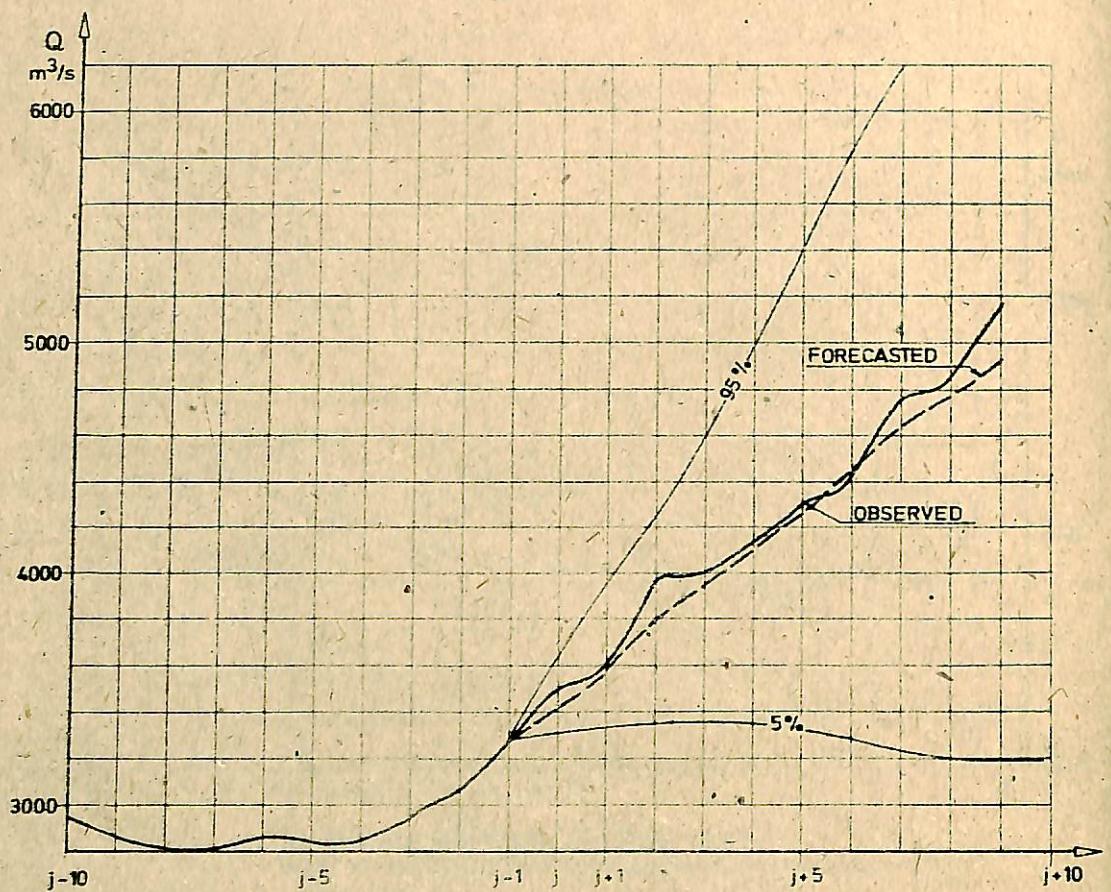


FIG. 6 - FORECASTED AND OBSERVED VALUES OF DAILY DISCHARGE WITH A CONFIDENCE INTERVAL OF 90%.

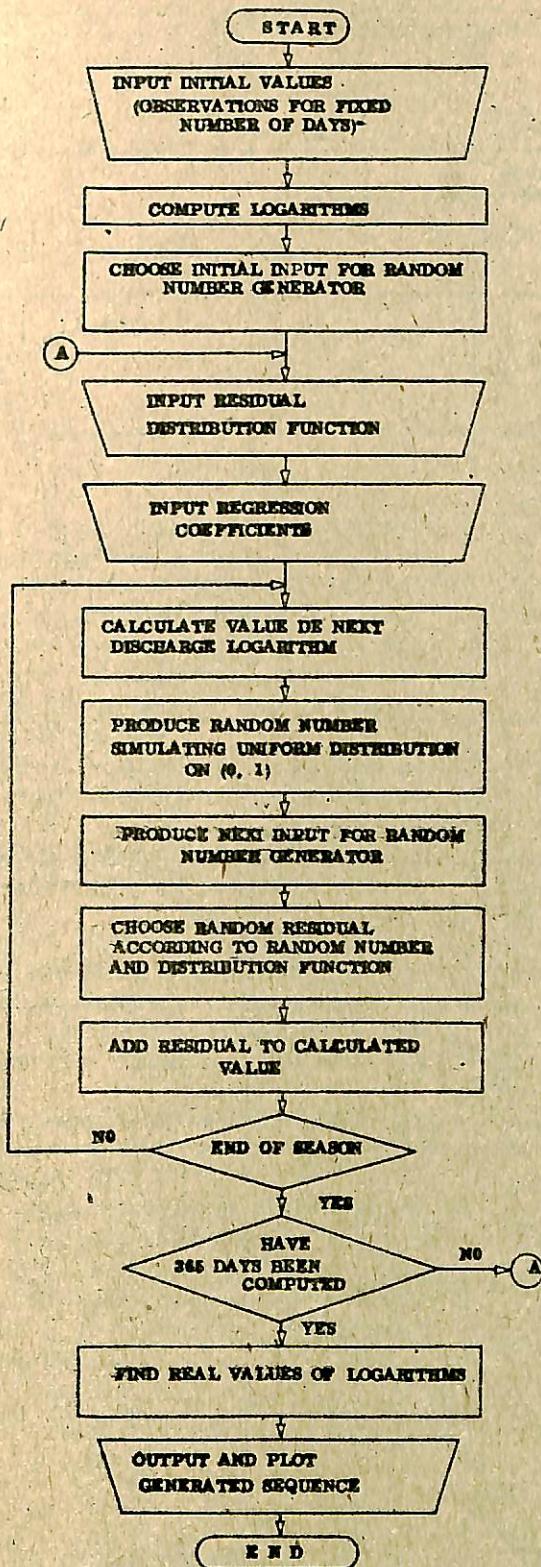


Fig. 7

FLOW DIAGRAM OF PROGRAM FOR SIMULATION

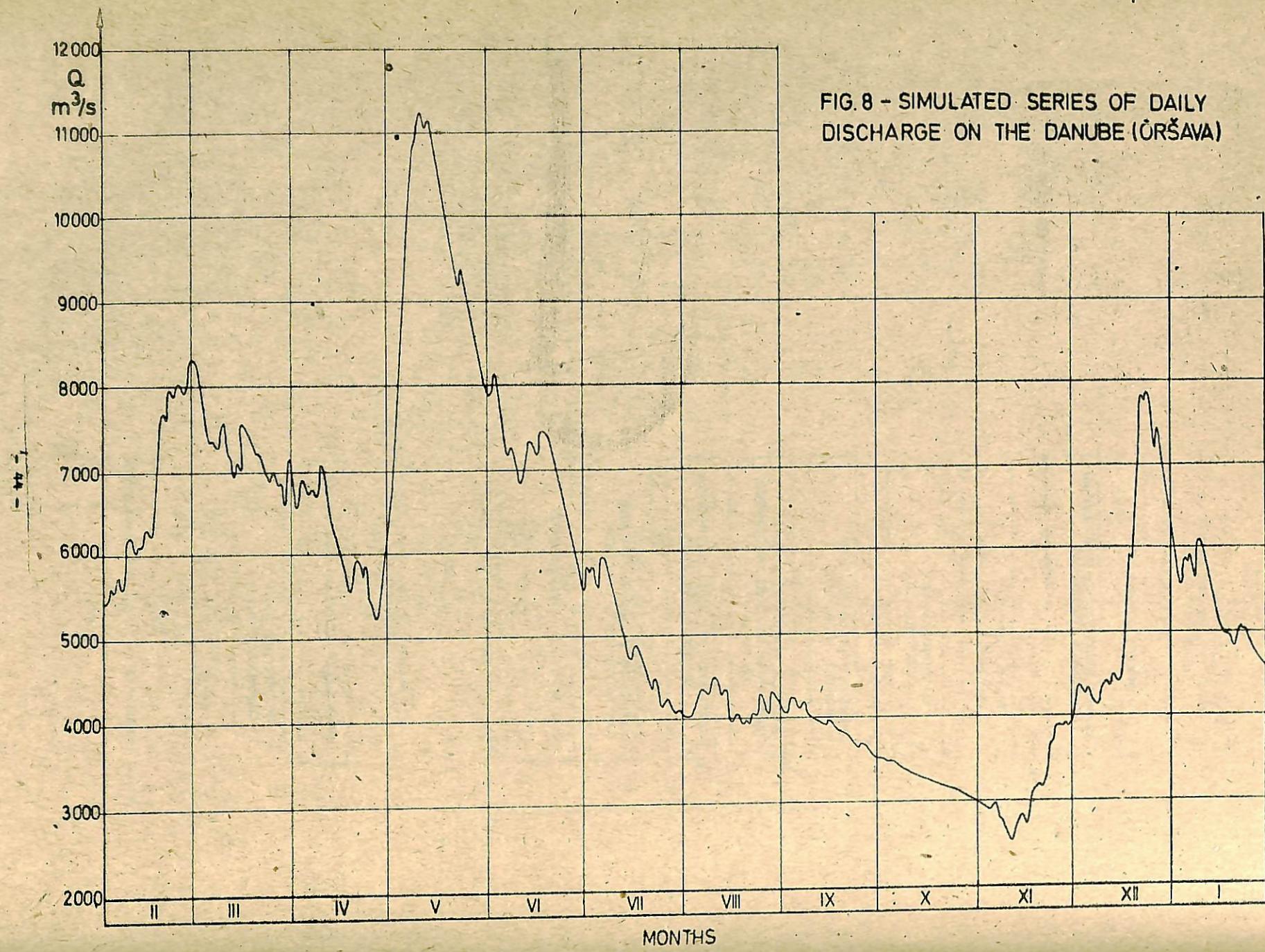


FIG. 8 - SIMULATED SERIES OF DAILY DISCHARGE ON THE DANUBE (ÚRŠAVA)

AUTOKORRELATIONSFUNKTIONEN DER ABFLÜSSE

TOKÁR, J.

Forschungsanstalt für Wasserwirtschaft
Budapest, Ungarn

P e s s i m e

При помощи корреляционного анализа можно определить тесноту взаимосвязи между двумя или несколькими переменными (например, расходами воды). В настоящей работе рассматриваются следующие вопросы:

- a) О возможности установления конкретной математической формулы для автокорреляционных функций $r(d)$, определенных по данным о среднегодовых расходах воды рек Венгрии.
- b) О влиянии выбора начального месяца расчетного годового периода на величину автокорреляционного коэффициента.
- c) Об изменении величины автокорреляционного коэффициента в зависимости от увеличения длины ряда расходов воды.
- d) Об изменении величины автокорреляционного коэффициента в результате водозабора из рек.
- e) Исследование матриц автокорреляционного коэффициента между среднемесячными расходами воды для составления искусственных рядов расходов воды венгерских рек.

Исследование выполнено по материалам наблюдений на 15 реках Венгрии; его результаты изложены в настоящей работе.

Полученные теоретические выводы могут быть использованы не только для многолетних прогнозов расходов воды, но и для решения других задач, например, для гидрологических расчетов при проектировании водохранилищ, для составления искусственных рядов расходов воды и т.д.

личер (z.B. Abflüsse) gewonnen werden. Die vorliegende Abhandlung beschäftigt sich mit folgenden Fragen:

- a) Kann eine konkrete mathematische Formel für die Autokorrelationsfunktion $r(d)$ der jährlichen Mittelabflüsse von Ungarns Wasserläufen angegeben werden?
- b) Wie wird der Wert des Autokorrelationskoeffizienten durch die Auswahl des Anfangsmonats der 1-jährigen Periode beeinflußt?
- c) Wie ändert sich der Wert des Autokorrelationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Verlängerung der Abflußreihe?
- d) Was für Eigenschaften weist die Matrix der Autokorrelationskoeffizienten der mittleren Monatsabflüsse auf? (Diese Eigenschaften können bei der Herstellung von künstlichen Abflußreihen von ungarischen Pegelquerschnitten praktisch ausgenutzt werden.)

Zwecks Beantwortung obiger Fragen wurden die Abflußreihen von 15 ungarischen Pegelquerschnitten untersucht. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden in der Abhandlung dargelegt.

Diese theoretischen Ergebnisse können nicht nur bei der langfristigen Abflußvorhersage, sondern auch zur Lösung mehrerer anderer Aufgaben (z.B. zur hydrologischen Bemessung von Speichersystemen zur Herstellung künstlicher Abflußreihen, usw.) gebraucht werden.

S u m m a r y

The application of the method of correlation analysis gives information on the strength of a relationship between two or more probability variables (e.g. discharges). The present paper deals with the following problems:

K u r z f a s s u n g

Mit der Methode der Korrelationsanalyse können Informationen über die Stärke des Verhältnisses zweier oder mehrerer Wahrscheinlichkeitsveränder-

a) Is it possible to give a concrete mathematical formula for the $r(d)$ autocorrelation functions calculated on the basis of the annual mean discharges of the watercourses in Hungary?

b) How does the choosing of the beginning month of the one-year period influence the value of the autocorrelation coefficient?

c) How does the value of the autocorrelation coefficient alter if the length of the discharge hydrograph increases?

d) How does the value of the autocorrelation coefficient alter as a result of water intakes?

e) Examination of the matrix of the autocorrelation coefficients between monthly mean discharges for practical presentation of artificial discharge sequences of the sections of watercourses in Hungary.

According to the above aspects studies have been made on 15 watercourses in Hungary. The detailed results are to be found in the paper.

These theoretical results would be useful not only for a long term forecasting of water discharges but also to clear up several other problems (for example: hydrological dimensioning of storage systems, the working out of artificial discharge sequences, etc.).

-funktionen der in bestimmten Pegelquerschnitten beobachteten (mittleren) Abflüsse hergestellt und analysiert.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können gewöhnlich mittelbar ausgenutzt werden. Die Kenntnis der Korrelations- und Autokorrelationskoeffizienten bzw. -funktionen gewisser hydrometeorologischen Kenngrößen ist nämlich ein wichtiger Arbeitsbehelf bei der Lösung mehrerer wasservorratswirtschaftlich-hydrologischer Aufgaben. So können z.B. die Autokorrelationskoeffizienten und -funktionen der Abflüsse u.a. bei der Lösung nachstehender Aufgaben nicht entbehrlich werden:

- Herstellung von künstlichen (synthetischen) Abflußreihen [5]

- Wasservorratswirtschaftliche Bemessung von Speichern und Speichersystemen

- Langfristige Vorhersage der zu erwartenden Abflüsse [1]

- Auswahl des zweckmäßigen Anfangs des hydrologischen Jahres

- Nachweis des Einflusses von menschlichen Eingriffen auf die Abflußreihen.

2. Zweck der Abhandlung

Vom Gesichtspunkt der in der Einführung aufgezählten Zwecke scheint es zeitgemäß zu sein, daß nun auch die Autokorrelationsfunktionen der ungarischen Wasserläufe hergestellt und analysiert werden. Mittels Erschließung ihrer allgemeinen Eigenschaften sollen zur Lösung der zu den aufgezählten Typen gehörenden wasservorratswirtschaftlich-hydrologischen Aufgaben in Ungarn gut brauchbare Ausgangsdaten bzw. Gesetzmäßigkeiten geliefert werden.

Die Untersuchungen sollen also die folgenden, Fragen beantworten:

a) Was für allgemeine Gesetzmäßigkeiten sind für die Autokorrelationsfunktionen $r(d)$ der mittleren Jahresabflüsse der ungarischen Wasserläufe kennzeichnend? Kann die konkrete Form der Funktion $r(d) = f(r(1))$ für das ganze Land oder für dessen einzelne Einzugsgebiete angegeben werden?

b) Wie wird der Wert des Korrelationskoeffizienten $r^{(i)}(1)$ des Mittelabflusses der 1-jährigen Periode - sowie die Werte einiger weiterer, zu zweckmäßig ausgewählten d_o -Werten gehörender Koeffizienten $r^{(i)}(d_o)$ - dadurch beeinflußt, welcher Monat als Anfangsmonat der 1-jährigen Periode gewählt wurde ($i = I., II., \dots, XII.$)? (Des weiteren wird der zu $d = 1$ gehörende Autokorrelationskoeffizient $r(1)$ mit $r(1)$ bezeichnet).

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten beschäftigten sich mehrere Hydrologen (unter ihnen Dyck und Schramm [1], Yevdjievich [6], Klemes [2], Krickij und Menkelj [3], Nachazel [4]) mit der Herstellung und Analyse

- von Autokorrelationskoeffizienten, die die Enge der Verhältnisse zwischen den benachbarten - bzw. voneinander in bestimmten Abständen liegenden Elementen einer gewissen hydrometeorologischen Beobachtungsreihe charakterisieren; bzw. von Autokorrelationsfunktionen, die als Reihen solcher Koeffizienten definiert werden.

Im Zuge dieser Untersuchungen wurden die (Cross-) Korrelationskoeffizienten zwischen verschiedenen hydrometeorologischen Kenngrößen (Niederschlag, effektiver Niederschlag, Gebietsabfluß), sowie vorzüglich die Autokorrelationskoeffizienten bzw.

c) Wie werden die Autokorrelationskoeffizienten dadurch beeinflußt, wenn ihre Werte nicht aus der ganzen zur Verfügung stehenden n -jährigen Probe, sondern aus deren kürzeren oder längeren Teilreihen errechnet werden?

d) Wie wirkt es sich auf die Werte der Autokorrelationskoeffizienten aus, wenn die zu ihrer Ermittlung verwendeten Abflußdaten - sozusagen die Wirkung der im Laufe der Zeit zunehmenden Wasserentnahmen nachahmend - vermindert werden?

e) Was für Gesetzmäßigkeiten können aus der Matrix

$$R = r_{ij} \quad i = I., II., \dots XII. \\ j = I., II., \dots XII.$$

der Korrelationskoeffizienten der mittleren Monatsabflüsse abgelesen werden? Worauf kann man vom Gesichtspunkt der Herstellung künstlicher Abflussreihen von ungarischen Pegelquerschnitten aus den Wertereihen der entsprechenden Eckdeterminanten obiger Matrix schließen?

3. Mathematische Grundbegriffe

Sind X und Y zwei Zufallsveränderliche (z.B. Abflüsse) und bezeichnen $x_1, x_2, \dots x_n$ bzw. $y_1, y_2, \dots y_n$ die aus denselben Beobachtungen vorhandenen statistischen Proben mit je n Elementen, so wird der die Enge des Verhältnisses zwischen x und y messende (empirische) Korrelationskoeffizient r_{xy} , durch

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

definiert, wo \bar{x} bzw. \bar{y} die Durchschnittswerte der Probenelemente x_i bzw. y_i bezeichnen.

Der Wert des Korrelationskoeffizienten r_{xy} kann zwischen -1 und +1 fallen.

$r_{xy} = 1$ weist ein lineares Verhältnis zwischen x und y aus. Im Falle $r_{xy} = 0$ besteht keine Korrelation zwischen x und y . Zwar sichert der Mangel einer Korrelation im allgemeinen die Unabhängigkeit der beiden Veränderlichen durchaus nicht in der Praxis der Hydrologie werden trotzdem die Veränderlichen x und y , falls der Wert von r_{xy} in eine bestimmte Umgebung von Null fällt, als unabhängig betrachtet.

Liegt eine, die Veränderliche Z betreffende Beobachtungsreihe $z_1, z_2, \dots z_n$ vor, wird der die Enge des Verhältnisses zwischen den durch $d-1$ andere Elemente getrennten Gliedern der Reihe kennzeichnende Autokorrelationskoeffizient r_{zz}^d eben-

falls mit Formel (1) definiert, wobei anstatt der Probe $x_1, x_2, \dots x_n$ die ersten $m-d$ Elemente der auf Z bezogenen Probe, d.h. $z_1, z_2, \dots z_{m-d}$, und anstatt der Probe $y_1, y_2, \dots y_n$, die letzten $m-d$ Elemente: $z_d+1, z_d+2, \dots z_m$ gesetzt werden müssen. Die Reihe $r_{zz}^{(1)}, r_{zz}^{(2)}, \dots r_{zz}^{(d)}$ der Autokorrelationskoeffizienten wird die Autokorrelationsfunktion der Veränderlichen Z genannt. Ihr Wertbereich reicht sinngemäß von -1 bis zu +1. Definitionsgemäß ist $r_{zz}(0) = 1$. Die Glieder der Punktreihe $r_{zz}^{(d)}$ werden mit einer stetigen Kurve (einer Funktion) miteinander verbunden, obwohl $r_{zz}^{(d)}$ streng genommen - nur für die nicht-negativen ganzzahligen d -Werte definiert ist. Die Ersetzung der Punktreihe durch eine Kurve ermöglicht es, daß eine sog. ausgleichende Funktion definiert wird. Diese seltene nähert sich der Punktreihe am besten an, wenn die Güte der Anpassung messende Streuung

$$D = \sqrt{\sum_{d=1}^n [r_{zz}^{(d)} - R(d)]^2} \quad (2)$$

ihre Minimum erreicht, wobei mit $R(d)$ die Ordinaten, der ausgleichenden Kurve bezeichnet werden.

Für die Bewertung der Autokorrelationskoeffizienten bzw. -funktionen ist es wichtig, beurteilen zu können, ob die Werte $r_{zz}^{(d)}$ signifikant außerhalb des Zufallsbereiches um Null fallen. Die Grenze $Q_1(d), Q_2(d)$ dieses Zufallsbereiches gibt Anderson [1] mit

$$Q_{1,2}(d) = \frac{-1 \pm 1,64 \sqrt{n-d-2}}{n-d-1} \quad (3)$$

an, wo n die Anzahl der verarbeiteten Daten bezeichnet. $r_{zz}^{(d)}$ unterscheidet sich also nicht signifikant von Null, falls die Bedingung

$$Q_2(d) \leq r_{zz}^{(d)} \leq Q_1(d) \quad (4)$$

erfüllt wird.

4. Die Datenverarbeitung

Zur Untersuchung wurden 15 als zuverlässig betrachtete Abflußpegel mit längeren Beobachtungsreihen ausgewählt (Abb. 1). Es kann angenommen werden, daß sie in ihrer Gesamtheit die Abflußverhältnisse der Wasserläufe des Landes gut charakterisieren. Als Grunddaten wurden die mittleren Monats- und Jahresabflüsse der ausgewählten Pegelquerschnitte verwendet.

Im Laufe der Datenverarbeitung wurden für sämtliche 15 Pegel foggende Kennwerte ermittelt:

a) Die Autokorrelationskoeffizienten $r^{(i)}(d)$ der mit dem Monat $i=I., II., \dots XII.$ beginnenden 1-jährigen Perioden für $d = 1, 2, \dots 30$.

b) Der Autokorrelationskoeffizient r_{ij} zwischen den Mittelabflüssen des i -ten und des j -ten Monats für jede mögliche Kombination der laufenden Nummern i und j ($i, j = I., II., \dots XII.$).

Die beträchtliche Aufwendigkeit der Berechnung von Korrelationskoeffizienten benötigte eine maschinelle Datenverarbeitung mittels einem Computer GIER 4 (Sprache: ALGOL). Ein beispielsweise ausgegriffenes Ergebnisprotokoll der Verarbeitung wird auf Abb. 2 gezeigt.

5. Ergebnisse

5.1. Gesetzmäßigkeiten der Funktionen $r(d)$

Zwei (empirische) Autokorrelationsfunktionen $r(d)$ der Mittelabflüsse 1-jähriger Perioden (mit verschiedenen Anfangsmonaten) von einem der 15 Pegelquerschnitte wird auf Abb. 3 gezeigt. Zu jedem der Querschnitte wurden 12 solche Funktionen $r(d)$ ermittelt.

Auffallend sind folgende Eigenschaften der $r(d)$ Kurven:

- Die Funktionen $r(d)$ haben gleichfalls positive und negative Werte, sie folgen also der KRICKIJ-MENKEL'sche Form $r(d) = r_1^d$ nicht [4].

- Die Funktionen $r(d)$ weisen eine ausgesprochen Periodizität auf; ihre Perioden liegen zwischen 13 und 15 Jahren.

- Die erhaltenen Funktionen $r(d)$ weisen - im Gegensatz zu denjenigen nach NACHAZEL [5] - keine Dämpfung auf, ja, die in der Umgebung von $d = 25-28$ sich meldenden lokalen Maxima übertreffen sogar die Höhen der ersten Gipfel.

- Die Auswahl des Anfangsmonats wirkt sich auf das Ganze der Funktion $r(d)$ - wenigstens im Bearbeitungsbereich $1 \leq d \leq 30$ - nicht beträchtlich aus.

An die erhaltenen empirischen Autokorrelationsfunktionen $r(d)$ wurden mit einfachen mathematischen Formeln angegebene Ausgleichskurven angepaßt. Die Ausgleichskurven der - die empirischen Autokorrelationsfunktionen definierenden - Punktreihen wurden in der Form:

$$R(d) = A \cdot r_1 \cdot \cos \frac{2\pi}{\omega} d \quad (5)$$

gesucht. Hier konnte die - die Periodenlänge aus-

drückende - Kontante ω von Abb. 3., sowie von den ähnlichen, der vorliegenden Abhandlung aber nicht beigelegten weiteren Diagrammen abgelesen werden. Der Koeffizient A der Ausgleichsfunktion wurde hingegen auf Grund der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

Unsere Erwartung, daß $A \cdot r_1 \sim \text{const}$ wäre, wurde nicht erfüllt. Für die Ausgleichsfunktionen nach (5) seien folgende zwei Beispiele gezeigt. An die Autokorrelationskoeffizienten der Mittelabflüsse von den mit November beginnenden 1-jährigen Perioden paßt sich am besten für den Pegel Nagymaros/Danau die Funktion

$$R(d) = 0,076 \cdot \cos \frac{2\pi}{13} d \quad (6)$$

an, während für die Theiss bei Szeged

$$R(d) = 0,149 \cdot \cos \frac{2\pi}{13} d \quad (7)$$

erhalten wurde. Die Streuungen betragen der Reihe nach 0,11 und 0,16, was als ein verhältnismäßig, gutes Ergebnis zu betrachten ist. Um aber einer daraus gezogenen allgemeinen günstigen Folgerung vorzubeugen, muß hier bemerkt werden, daß im Falle einer Annäherung nach (3) der Mittelwert der Streuungen sämtlicher 15 Querschnitte schon 0,22 beträgt.

Die somit ermittelten Autokorrelationfunktionen $R(d)$ können nicht nur bei einer langfristigen Abflußvorhersage gute Dienste leisten, sondern auch im Falle, wenn zu irgendeinem Speicherbeckenbemessungs-Verfahren eine lange Reihe der Koeffizienten $r(d)$ benötigt wird, aber mangels genügender Beobachtungsdaten höchstens der Wert r_1 geschätzt werden kann.

Als Verallgemeinerung der Ausgleichsfunktionen einzelner Pegel wurden auch die durchschnittlichen Ausgleichsfunktionen für Pegelgruppen ermittelt. Es war zweckmäßig, an die mittels Durchschnittsbildung, erhaltene Punktreihe eine Ausgleichskurve des Typs

$$\bar{R}(d) = B - C \mid \sin \frac{\pi}{\omega} d \mid \quad (8)$$

anzupassen. Hier ist ebenfalls die Periodenlänge (für die Pegel des Theiss-Systems ist $\omega = 13$), und die Konstanten B und C wurden wiederum mit der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

Für das Theiss-System ergab sich (Abb. 4):

$$\bar{R}(d) = 0,32 - 0,52 \sin \frac{\pi}{13} d \quad (9)$$

Die Streuung der Anpassung liegt bei 0,18.

Diese durchschnittliche Ausgleichskurve kann in denjenigen Fällen nützlich sein, wo die zur Ermittlung der Autokorrelationsfunktion benötigten Beobachtungen überhaupt fehlen, so daß nicht einmal der Wert r_1 geschätzt werden kann. Natürlich gewährleistet die Funktion $\bar{R}(d)$ nur eine grobe Information, darf also nur mangels einer besseren Lösung

(z.B. mangels Anwendbarkeit einer Analogie) gebraucht werden.

Es wurde versucht, die Funktion $\bar{R}(d)$ auch für die Pegel des Donau-Systems zu ermitteln. In diesem Falle ergab sich aber eine so schlechte Anpassung (Streuung: 0,37), daß die so gewonnene Kurve nicht einmal als erste grobe Information annehmbar ist.

Als erste Ursache dieses negativen Ergebnisses kann die Tatsache betrachtet werden, daß die Flächen der Einzugsgebiete, die zu den 6 Pegeln des Donau-Systems gehören, zwischen beträchtlich weiteren Grenzen (460 und 183.000 km²) liegen, als diejenigen des Theiss-Systems. Dazu kommt noch, daß das typisch alpine Abflußregime der Donau sich von demjenigen ihrer kleinen ungarischen Zubringer beträchtlich abhebt.

5.2. Einfluß des Anfangsmonats

Abb.5. zeigt die Durchschnittswerte der Koeffizienten r_1 von 15 Pegel in Abhängigkeit vom Anfangsmonat.

Es ist zu erkennen, daß das Minimum des durchschnittlichen r_1 -Wertes zu der mit dem Monat März beginnenden 1-jährigen Periode gehört. Diese Feststellung wird auch von den (hier nicht beigelegten) $r_1(i)$ Funktionen der einzelnen Pegel unterstützt, wovon 85% (Abb.5.) ähnlich verlaufen (sie erreichen also ihre Minima in einem der Frühlingsmonate) während bei den übrigen untereinander aber im wesentlichen ebenfalls ähnlichen 15% das Minimum in der Periode November-Februar zu finden ist.

Dieses Ergebnis bestärkt also die Feststellung von DYCK und SCHRAMM [1], laut welcher es richtiger wäre, den Anfang des hydrologischen Jahres vom üblichen November auf einen Frühlingsmonat (z.B. auf März) zu verschieben.

5.3. Einfluß der Länge der Datenreihe

Die längste der zu Verfügung stehenden Beobachtungsreihen (Donau, Nagymaros; 1883-1962) wurde in 20, 40 bzw. 60 jährige Teilperioden aufgeteilt (Abb.6.). Auch der Anfangsmonat der betrachteten 1-jährigen Periode wurde jeweils geändert.

Die Untersuchung der aus den verschiedenen Datenreihen erhaltenen r_1 -Werte führte zu folgenden Feststellungen:

- Es ist keine Tendenz bemerkbar, daß der Wert von r_1 mit der Verlängerung der Datenreihe sich vermindert.

- Der Autokorrelationskoeffizient r_1 einer bestimmten Reihe kann als Mittelwert der Koeffizienten ihrer ersten und zweiten Hälfte (r_{11} und r_{12}) zuverlässig geschätzt werden.

Letztere Bemerkung ermöglicht es, den Autokorrelationskoeffizienten einer langen Abflußreihe aus deren Teilen zu schätzen. Dies kann von Bedeutung sein, wenn nur eine größerenordnungsmäßige Schätzung des Koeffizienten vonnöten ist.

5.4. Einfluß der Stützung der Datenreihe

Mit der Auswirkung der Stützung von Abflußreihen beschäftigte sich YEVDJEVICH [6]. Er stellte fest, daß durch die Stützung der Wert des Autokorrelationskoeffizienten im allgemeinen vermindert wird.

Es ist offensichtlich, daß diese Feststellung in aller Allgemeinheit nicht gültig sein kann. Leicht ist dafür ein Gegenbeispiel zu konstruieren: wenn nämlich die Glieder der Abflußreihe so gestutzt werden, daß die größeren Glieder um mehr, die kleineren aber um weniger vermindert werden, wird der Wert des Autokorrelationskoeffizienten sich nicht vermindern, sondern er wird vielmehr zunehmen. In der wasserwirtschaftlichen Praxis werden aber gerade die kleineren Abflüsse mit größeren Wasserentnahmen belastet, das Abflußregime wird extremistischer, der Wert des Autokorrelationskoeffizienten nimmt also wirklich ab.

Es sind noch Untersuchungen im Gange, die die Ermittlung des Einflusses der - einen künstlichen Eingriff nachahmenden - Stützung von Abflußreihen ungarischer Pegelquerschnitte zum Zweck haben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können später auf inverse Art verwendet werden: aus den zeitlichen Änderungen des Autokorrelationskoeffizienten können nämlich Folgerungen betreffend die menschlichen Eingriffe gezogen werden.

5.5. Eigenschaften der Autokorrelationsmatrizen

Auf Grund der Untersuchung der erhaltenen Matrizen können folgende Feststellungen gemacht werden:

- Die größten Autokorrelationskoeffizienten sind im allgemeinen diejenigen der benachbarten Monate.

- Der Koeffizient des betrachteten und des darauffolgenden Monats wird, im allgemeinen von dem-

jenigen des betrachteten und des vorangehenden Monats übertroffen. Die Reihe der Autokorrelationskoeffizienten vermindert sich trotzdem nicht monoton, was durch den Monat November, der für obige Feststellung eine Ausnahme bildet, gesichert wird.

Die Werte der - bei Herstellung künstlicher Abflußreihen wichtigen - Eckdeterminate vermindern sich mit der Zunahme der Ordnung der Determinante. Als Beispiel dafür seien hier die Werte der ersten, fünften Eckdeterminate der zu Donau, Nagymaros gehörenden Matrix aufgezählt:

1; 0,85; 0,64; 0,56; 0,34

Schrifttum

6. Hauptrichtungen der weiteren Forschung

Bei der Untersuchung von Autokorrelationsmatrizen der mittleren Monatsabflüsse, wurde bisher der Effekt der sich innerhalb des Jahres ändernden Insolation außer Acht gelassen. Dieser Effekt kann schon an sich eine gewisse Periodizität verursachen. Dieser Tatsache Rechnung tragend, scheint es zweckmäßig zu sein, jedes Glied in der Reihe der Monatsabflüsse durch sein Verhältnis zu seinem vieljährigen Mittelwert zu ersetzen. Nächstens werden die Untersuchungen mit solchen sog. normierten Reihen fortgesetzt.

Unser weiteres Vorhaben ist, auch Niederschlagsreihen in die Untersuchungen miteinzubeziehen, zwecks

- Herstellung von empirischen und ausgleichenden Autokorrelationsfunktionen der Niederschläge,
- Vergleichung letzterer mit denjenigen der Abflüsse; endlich
- Ermittlung der Korrelationskoeffizienten zwischen entsprechender Niederschlags- und Abflußreihen.

- [1]. Dyck, S.- Schramm, M.: Stochastische Methoden, der Speicherwirtschaft. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft, 28/1968, VEB/10 Verlag für Bauwesen, Berlin, 1968
- [2]. Klemes, V.: Problémy kolem koeficientu korelace odtoku sousedních let a jeho závádení do výpoctu regulování odtoku. Prehradní dny. Praha, 1965
- [3]. Krickij, S. N. - Menkel', M. F.: Rascet mnogolетnogo regulirovaniya rechnogo stoka s uchetom korrelativnoj svjazi mezdu stokom smeznykh let. Aus: Problemy regulirovaniya rechnogo stoka. Ausg. 8, AN SSSR, Moskau, 1959
- [4]. Nacházel, L.: Nalepsovacu ucinek viceletnych nádrzi jako funkce stacionarity stochastickych procesu odtoku. Prehradní dny. Praha, 1965
- [5]. Svanidze, G. G.: Modeliravanie gidrologicheskikh rjadov s uchetom vnutrigodovogo respredelenija stoka (Metod fragmentov). Doklady Gidrologiceskoj Konferencii Instituta Gidrologii i Gidravliki Cechoslovakoj A. N. Bratislava, 1962
- [6]. Yevdjevich, V. M.: Climatic fluctuations studied by using annual flows and effective annual precipitations. UNESCO, Arid Zone Research XX. 1963.



Abb. 1. Die Abflußmeßpegel, deren Daten verarbeitet wurden

4. ALLOMAS 68 EV 7,7 6,9 4,5 2,1 3,3 3,0

A./ FELADAT

HO	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	0,3439	0,3764	0,4094	0,4142	0,3523	0,4545	0,4092	0,5923	0,4104	0,3933
1	0,2025	0,2461	0,2349	0,1967	0,1763	0,1213	0,1277	0,1250	0,1908	0,2041
2	0,1328	0,1668	0,1782	0,1684	0,1275	0,1420	0,1663	0,1888	0,1518	0,2062
3	0,0967	0,0734	0,0687	0,0572	0,0870	0,1772	0,1412	0,1186	0,1009	0,2049
4	-0,0644	-0,0526	-0,0258	0,0097	-0,0021	-0,0338	-0,0141	-0,0128	0,0110	0,1411
5	-0,1434	-0,1798	-0,1952	-0,1959	-0,1783	-0,1411	-0,1998	-0,2173	-0,2289	0,1118
6	-0,1549	-0,1533	-0,1441	-0,1071	-0,1076	-0,1685	-0,1821	-0,1663	-0,1611	-0,0250
7	-0,1716	-0,1994	-0,1966	-0,2018	-0,1787	-0,1544	-0,0966	-0,1118	-0,1319	-0,0514
8	-0,1645	-0,1873	-0,2352	-0,3013	-0,2371	-0,1798	-0,2069	-0,1652	-0,1482	0,1555
9	-0,1385	-0,1624	-0,1551	-0,1213	-0,1006	-0,0841	-0,0589	-0,0715	-0,0976	-0,1545
10	-0,0970	-0,0952	-0,0645	-0,0195	-0,0626	-0,1456	-0,1456	-0,1656	-0,1665	0,1236
11	-0,0394	-0,0556	-0,0670	-0,0593	-0,0423	-0,0592	-0,0489	-0,0304	-0,0190	0,1314
12	-0,0026	-0,0121	-0,0106	-0,0042	-0,0070	0,0169	0,0264	0,0100	0,0006	-0,0961
13	0,0336	0,0465	0,0309	0,0168	0,0247	0,0238	-0,0131	0,0136	0,0026	-0,0450
14	0,0148	0,0350	0,0217	0,0266	-0,0138	-0,0579	0,0110	0,0085	0,0074	0,0121
15	0,0022	-0,0060	-0,0265	-0,0484	0,0151	0,0685	0,0187	-0,0195	0,0152	-0,0074
16	-0,0473	-0,0464	-0,0399	-0,0603	-0,0935	-0,0922	-0,0871	-0,0243	0,0180	0,0120
17	-0,1137	-0,1374	-0,1022	-0,0424	-0,0677	-0,1379	-0,1205	-0,1299	-0,1490	0,0120
18	-0,2045	-0,2388	-0,2664	-0,3100	-0,2625	-0,2456	-0,2530	-0,2593	-0,2653	-0,1907
19	-0,2629	-0,2504	-0,2688	-0,2869	-0,2231	-0,1600	-0,1835	-0,1827	-0,1826	-0,2275
20	0,0243	0,0088	0,0041	0,0046	0,0218	0,0094	-0,0110	-0,0300	-0,0164	-0,2203
21	0,0505	0,0160	0,0283	0,0057	0,0584	0,0602	0,0105	0,1372	0,1059	0,0121
22	0,0030	0,0198	0,0034	0,0541	0,1023	-0,0618	0,0372	-0,0306	0,0964	0,0356
23	0,0731	0,1275	0,1566	0,0859	0,0170	0,0371	0,0364	0,0261	0,0845	0,0762
24	0,3960	0,3728	0,3559	0,3421	0,172	0,4127	0,3927	0,5980	0,3865	0,0665
25	0,2813	0,2691	0,2975	0,3199	0,3776	0,4351	0,4575	0,4133	0,3853	0,3941
26	0,0466	0,1341	0,1135	0,1024	0,0243	0,0181	-0,0069	0,0020	0,0367	0,3291
27	0,0395	0,0324	0,0801	0,2011	0,1447	-0,0836	-0,0877	-0,0950	0,0571	0,3039
28	0,0963	0,1615	0,1420	0,0522	-0,0667	0,0538	0,0534	0,0493	0,1041	0,0490
29	-0,1277	-0,1109	-0,1193	-0,0634	-0,0251	-0,0243	-0,0155	-0,0314	-0,0449	0,0568
30										0,0875

B./ FELADAT

HO	T	2	3	4	5	6
II	0,5036	0,2840	0,4472	0,4925	0,3037	0,136
12	0,7009	0,3455	0,1265	0,1747	0,277	0,2579
1	0,3140	0,0182	0,1301	0,0915	0,1239	0,201
2	0,3063	0,3529	0,189	0,0722	0,0496	0,0093
3	0,3997	0,2614	0,1459	0,0509	-0,0364	0,0129
4	0,3871	0,1743	-0,0116	-0,0116	0,0047	0,2572
5	0,2710	0,0641	0,0220	0,1420	0,2397	0,3107
6	0,6457	0,0490	0,0380	0,3160	0,1675	0,2539
7	0,0684	0,0229	0,2956	0,1916	0,2586	0,2031
8	0,9287	0,3250	0,1277	0,1055	0,0333	0,0093
9	0,3817	0,1848	0,1980	0,1446	0,0205	0,0129
10	0,1897	0,2103	0,2870	0,0684	0,0988	0,2572

Abb 2 Ergebnisprotokoll der Programme A und B. Fluß Zagyva, Pegel Jásztelek (1901-1968)

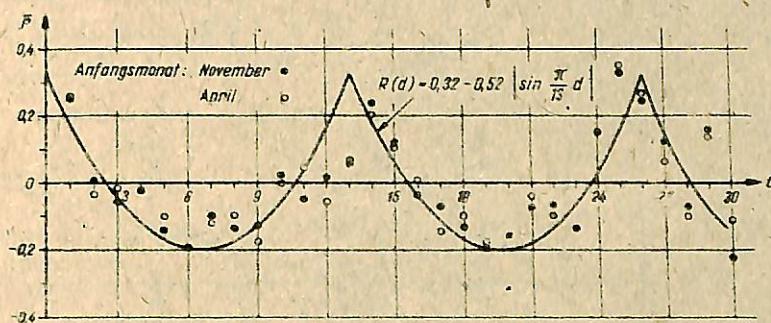
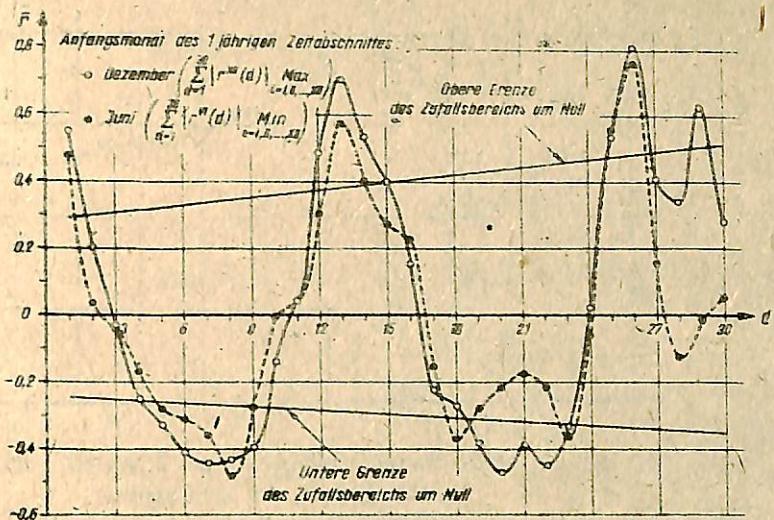


Abb. 4. Durchschnittliche Autokorrelationsfunktion der mittleren Jahresabflüsse im Theiß-System

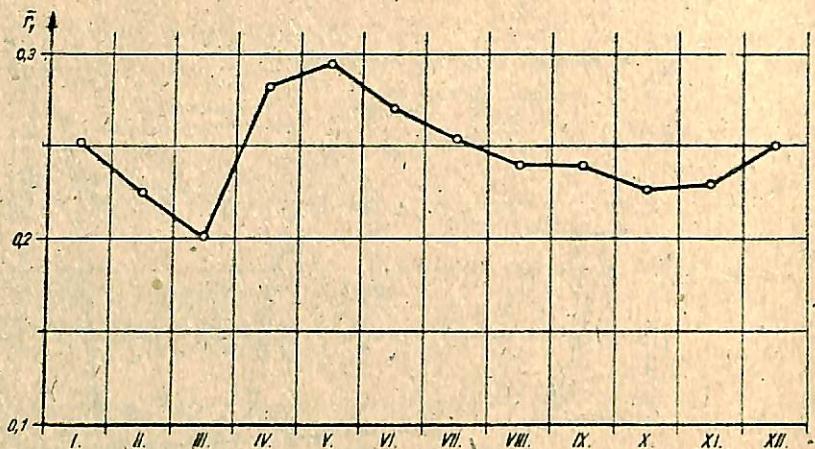


Abb. 5. Der Autokorrelationskoeffizient r_t , der 1 jährigen Zeitabschnitten in Abhängigkeit vom Anfangsmonat
(Mittelwerte von 15 Pegelquerschnitten)

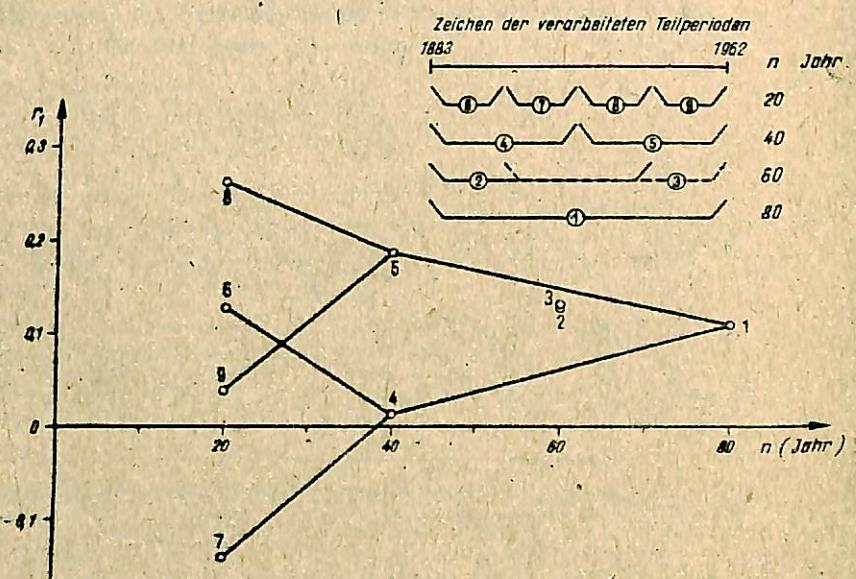


Abb. 6. Der Autokorrelationskoeffizient r_t , in Abhängigkeit von der Länge der Beobachtungsreihe.
Donau, Pegel Nagymaros (1883-1952)

EIN NEUER VORSCHLAG ZUR BESTIMMUNG DER ABFLUSS-
WAHRSCHEINLICHKEIT, DARGESTELLT AM BEISPIEL DES
PEGEIS KELHEIM/DONAU.

MENDEL, H.

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BRD

Р е з и м е

При определении вероятности расходов воды по данным многолетних наблюдений эмпирическое распределение их повторяемости до сих пор определялось приблизительно путем сопоставления статистических данных с данными математической функции (Фостер, Гумбель). Нами предлагается метод, отличающийся от применяемого до сих пор тем, что приближение осуществляется при помощи метода наименьших квадратов и используется математический закон более общего характера.

По предложеному методу установлено соотношение "модуль расхода - время" на примере средних годовых расходов воды р.Дуная у Кельгейме за период наблюдений с 1845 по 1970 год. Расчеты выполнены на электронном вычислительном устройстве IBM 7090 (в Бонском университете) на программном языке фортран IV. Для более широких исследований полученные данные можно автоматизировать до логической операции "или"/"и" и изображать их в графическом виде.

K u r z f a s s u n g

Bei der Bestimmung der Abflusswahrscheinlichkeit auf der Grundlage einer langen Meßreihe wird derzeitig die empirische Häufigkeitsverteilung der Abflüsse durch Gleichsetzen der statistischen Momente mit denen einer mathematischen Funktion angenähert (Forster, Gumbel). In diesem Vortrag wird ein Weg vorgeschlagen, der sich davon in zweifacher Hinsicht unterscheidet:

1. die Annäherung erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate und
2. es wird ein weit universelleres mathematisches Verteilungsgesetz angewendet.

Am Beispiel der jährlichen Spitzenabflüsse von 1845 bis 1970 bei Kelheim/Donau wird nach diesem Verfahren die Beziehung Abflußpende-Zeit hergestellt. Alle Rechnungen wurden in der Programmiersprache Fortran IV mit der elektronischen Datenverarbeitungsanlage IBM 7090 (Universität Bonn) durchgeführt, sie können für umfangreichere Untersuchungen bis zur tabellarischen oder/und graphischen Darstellung der Ergebnisse automatisiert werden.

S u m m a r y

For the determination of discharge probability on the basis of a long-term measurement series, the empirical discharge frequency distribution is, at the present stage, approximated by equating the statistical moments with those of a mathematical function (Forster, Gumbel). The present paper suggests a procedure that differs from the said method in two respects, as follows:

1. approximation is effected according to the method of the least squares, and
2. a far more universal mathematical law of distribution is applied.

Using the annual peak discharges measured at Kelheim (Danube) during the period of 1845-1970 as an example, the relation between specific yield

and time is established according to this method. All calculations were carried out in computer language Fortran IV on an electronic data processing installation IBM 7090 at Bonn University; for the purpose of more extensive investigations, automation including tabulation and/or graphical representation of results is possible.

1. Einleitung

Der Begriff "Abflusswahrscheinlichkeit" lässt eine Aussage über den in einem bestimmten Zeitraum an einer Stelle des Gewässers zu erwartenden Extremabfluss zu. Da von wasserbaulichem wie von theoretischem Standpunkt aus ein außerordentlich großes Interesse an der Kenntnis dieser Größe besteht, wurde in neuerer Zeit eine Vielzahl von Verfahren entwickelt, die man in eine theoretische und eine empirische Gruppe einteilen kann. Das hier vorgeschlagene Verfahren mittels Verteilungsfunktion zählt zu der theoretischen Gruppe, deren Grundlagen im wesentlichen von PEARSON [1], FOSTER, [2] und GUMBEL [3] stammen. Die hier aufgezeigten methodischen Grundlagen sind zwar von den zitierten Verfassern übernommen, jedoch kommt man nach einer genaueren Durchleuchtung der analytischen Zusammenhänge und bei Verwendung elektronischer Großrechenanlagen sehr rasch zu wesentlich genaueren Ergebnissen. Dabei müssen die einzelnen Werte der zugrunde liegenden Meßreihe vergleichbar und zuverlässig sein.

2. Grundlagen der klassischen Verfahren mittels Verteilungsfunktion und ihre Modifizierung

Die statistisch unabhängigen Abflusswerte einer langen Meßreihe werden nach der Häufigkeit ihres Auftretens in Klassen geeigneter Größe eingeteilt. Die so gewonnene Häufigkeitsverteilung $\varphi(Q)$ liefert über ihre Extremwerte hinaus keine Aussage, dazu ist eine mathematische Annäherung $f(Q)$ und eine dadurch festgelegte Extrapolation über die gemessenen Extremabflüsse hinaus notwendig. Diese Annäherung geschieht prinzipiell durch Gleichsetzen der statistischen Kenngrößen wie Mittelwerte und Schiefe von $\varphi(Q)$ und $f(Q)$, wobei die geeignete mathematische Funktion meist über einen statistischen Test (z.B. χ^2) ermittelt wird.

Die erste Kritik betrifft die Funktion $f(x)$: Es finden Funktionen Verwendung, die in Richtung wachsender Abflüsse nach einer festen Gesetzmäßigkeit abfallen (z.B. PEARSON/POSTER: $e^{-c \text{const} \cdot x}$), oder einen bis in negative Abflüsse (!) reichenden Ast

haben (GUMBEL: Extremal Typ I); gar nicht selten wird auch auf die vertraute Normalverteilung zurückgegriffen, die darüber hinaus schon wegen ihrer symmetrischen Form den Beobachtungen von vornherein nicht gerecht werden kann. Im Gegensatz dazu erfüllt die in Abschnitt 3 behandelte verallgemeinerte logarithmische Gammaverteilung alle von seiten einer empirischen, eingipfligen hydrologischen Häufigkeitsverteilung gestellten Forderungen.

Die zweite Kritik betrifft die Art der Anpassung: Die o.a. Methode ist zwar einfach und bei umfangreichen Untersuchungen vertretbar, es ist jedoch sinnvoller, die Annäherung direkt, etwa nach der Methode der kleinsten Quadrate vorzunehmen. Einerseits liefert die kleinste Summe der Abweichungsquadrate die Parameter (Regressionskoeffizienten) von $f(Q)$ und andererseits wird damit aus einer Reihe zur Auswahl vorliegender Kurven die geeignete ausgewählt.

3. Zur Theorie der Verteilungsfunktion

Das in der Hydrologie viel verwendete mathematische Verteilungsgesetz Nr. 3 von PEARSON ist identisch mit der aus Mathematik und Physik bekannten Gamma-Verteilung [4], die eine reelle eingipflige, normierte Funktion in der $x-y$ -Ebene darstellt mit einer zu definierenden linken Schranke (z.B. $x=0$) und einem exponentiellen Abfall an die positive x -Achse:

$$y = \frac{b^{a+1}}{\Gamma(a+1)} x^a e^{-bx} \quad (1)$$

a und b sind die Regressionskoeffizienten und Γ ist die bekannte Gammafunktion. Die Kenngrößen Mittelwerte, Varianz usw. von (1) lassen sich einfach angeben, ebenso die dazugehörige Verteilungsfunktion (Summenfunktion).

Führt man einen weiteren Koeffizienten ein, so erhält man eine ungleich allgemeinere Verteilung:

$$y = c \frac{\frac{a+1}{b}}{\Gamma(\frac{a+1}{b})} x^{\frac{a}{b}} e^{-\frac{bx}{b}} \quad (2)$$

deren Kenngrößen ebenfalls geschlossen angegeben werden können, während die Summenfunktion numerisch zu bestimmen ist. c beschreibt die Stärke des exponentiellen Abfalls.

Sonderfälle von (2) sind die Maxwell-Verteilung ($c = 2$) und die Normalverteilung von Gauss ($c = 2$, $a = 0$, $b = 1/2 \sigma^2$), wobei der verdoppelte Gültigkeitsbereich $-\infty < x < +\infty$ den doppelten Normfaktor bedingt.

Eine von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Untersuchung über die Häufigkeitsverteilung der Abflüsse in einigen kleinsten deutschen Einzugsgebieten hat die Überlegenheit von (2) gegenüber der einfachen Gamma- (= PEARSON-Typ III-) Verteilung bestätigt [5]. Eine weitere Verbesserung erhält man, wenn man zur logarithmischen Verteilung übergeht; das ist zwar mit der Einführung eines weiteren Koeffizienten d (= Nullstelle der dazugehörigen Gammaverteilung) verbunden, bedeutet aber bei der heutzutage üblichen Benutzung elektronischer Großrechner nicht zwangsläufig eine größere Unhandlichkeit. Diese verallgemeinerte logarithmische Gamma-Verteilung.

$$y=c \frac{\frac{a+1}{b}}{\Gamma\left(\frac{a+1}{c}\right)x^d} e^{-b(\ln(x+e^d)-d)^c}. \quad (3)$$

ist keineswegs identisch mit der beim Einheitsverfahren der USA benutzten "logarithmischen" PEARSON -Typ III-Verteilung, dann bei dieser ist $c = 1$ und x lediglich durch den Logarithmus von x ersetzt, wodurch darüberhinaus die Normierung verloren geht.

(3) ist in analoger Weise eine Verallgemeinerung der bekannten logarithmischen Normalverteilung. Eine detaillierte Untersuchung der Bedeutung von a , b , c und d in (3) würde hier zu weit führen; es sei wieder auf [5] verwiesen; dort wird auch gezeigt, daß andere in der Hydrologie verwendete Verteilungsgesetze (z.B. die Extremalverteilungen mit deren logarithmischen Varianten) in Sonderfällen zwar gute Ergebnisse bringen können, in den untersuchten Fällen jedoch stets von der allgemeinen logarithmischen Gamma-Verteilung (3) übertroffen werden.

4. Aufbereitung der vorliegenden Meßreihe und Bestimmung der Regressionskoeffizienten

Die 126jährige Reihe der jährlichen Spitzenabflüsse 1845/1970 am Donau-Pegel Kelheim wurde von der Landesstelle für Gewässerkunde in München in mühevoller Kleinarbeit erstellt. Die Abflüsse sind auf die damaligen Abflusverhältnisse bezogen; um den jetzigen Verhältnissen Rechnung zu tragen, müßten die Werte nach vorläufigen, noch nicht abgeschlossenen Ermittlungen unterschiedlich und bis zu 15% erhöht werden. Mit diesen dann vorbehaltlos vergleichbaren Werten sind natürlich genauere Ergebnisse zu erwarten; in Erwartung besserer Unterlagen wird man jedoch vorerst nicht auf diese oder ähnliche Untersuchungen verzichten können.

Vor der Berechnung der Regressionskoeffizienten ist zu beachten:

1. Die Meßwerte können als Abflüsse oder - so hier - als Abflußpenden in die Rechnung eingehen; eine Übertragung in Abflüsse und Wasserstände ist nachträglich möglich.
2. Die Abflußpenden werden in Klassen bestimmter Breite KB zusammengefaßt. Hier hat sich $KB = 3 l/s \cdot km^2$ als geeignet herausgestellt, bei $KB < 2$ ist die Streuung zu groß.
3. Das Sortieren der Meßwerte einschließlich der Umrechnung in Abflußpenden besorgt ein einfaches Computerprogramm.
4. Über die linke Begrenzung Q_0 der mathematischen Verteilung $f(Q)$ besteht keine einheitliche Meinung [6]. Oft bleibt die Frage unbeantwortet oder es wird $Q_0 = 0$ gesetzt (d.h. alle Abflüsse > 0 sind möglich); hier, wo der Akzent auf der Hochwasserwahrscheinlichkeit liegt, soll $f(Q)$ eine Einheit vor dem ersten positiven Wert der empirischen Häufigkeitsverteilung $\varphi(Q)$ beginnen.

Die Annäherung an $\varphi(Q)$ und damit die Bestimmung der Regressionskoeffizienten erfolgt nach der bekannten Methode der kleinsten Quadrate, d. h. es wird durch schrittweise Näherung eine Koeffizientenkombination ermittelt, für die

$$S = \sum (f(Q_k) - \varphi(Q_k))^2 \quad (4)$$

zu einem Minimum wird.

Es seien $c = c_1$ und $d = d_1$ zwei plausible Anfangswerte (z.B. $c_1 = 1$ und $d_1 = 0$). Die für eine Reihe im 1. Schritt weitgestreuter und ansteigender Werte a_i , $i = 1, \dots, n$ und b_j , $j = 1, \dots, m$ berechneten Ausdrücke (4) können als $S_{i,j}$ -Matrix dargestellt werden, deren Minima ungefähr in der Hauptdiagonalen liegen. Zur gesuchten Koeffizientenkombination gelangt man durch Wiederholung des Verfahrens, zunächst (bei $c = c_1$) für mehrere d - und schließlich für mehrere c -Werte. Aus Tab. 1 ($c=6$, $d=-1,4; -1,6; \dots; -2,4$) gelangt man zu Abb. 1a mit dem kleinsten Wert $S_{MIN} = 0,14652$ bei $c = 6,0 \pm 0,2$ und $d = -1,8 \pm 0,2$. Für Zwischenwerte benutzt man in Abb. 1b die punktierte Kurve für die Minima S_M . Man ersieht daraus - das hat sich auch bei ähnlichen Untersuchungen von 8 weiteren Einzugsgebieten bestätigt - noch die große Spannweite von b und die vergleichsweise kleine der übrigen Koeffizienten:

0,8	$\leq a \leq$	60
10^{-5}	$\leq b \leq$	10^5
7	$\leq c \leq$	0,5
-5	$\leq d \leq$	12

5. Die Verteilungsfunktion (Summenkurve)

Die Integration

$$F(x) = \int_{x_0}^x f(x) dx \quad (5)$$

ist für die verallgemeinerte logarithmische Gamma-Verteilung weder geschlossen noch über eine Reihenentwicklung, sondern nur numerisch möglich (Parabel 3. oder 5. Ordnung). Dabei lässt sich eine Genauigkeitsbetrachtung auf indirektem Wege durch analoge Behandlung einer analytisch geschlossenen vorliegenden Verteilungsdichte und -Funktion erreichen (z.B. Extremal Typ II). Es zeigt sich, daß der Fehler auch bei großem Argument unter 10^{-5} liegt.

In Abb. 2 sind die Ergebnisse zusammengefaßt:

1. Die empirische Häufigkeitsverteilung $\varphi(Q)$ über der Abflußpende $Q [l/s km^2]$, $KB = 2 l/s km^2$.
2. Die mathematische Annäherung (Verteilungsdichte) $f(Q)$ über der normierten Abflußpende $(Q/10)$.
3. Die empirische Summenkurve $\bar{\Phi}(Q)$; entsprechend der vorliegenden Jahresreihe ist $0 \leq Q \leq 126$
4. Die mathematische Summenkurve $F(Q)$ (Verteilung von f), die identisch ist mit der Unterschreitungswahrscheinlichkeit w_u .

Mit w_u ist auch die Überschreitungswahrscheinlichkeit $w_d = 1 - w_u$ bestimmt, wodurch der Zusammenhang mit $T = 1/w_d$ (Zeitintervall, in dem Q einmal zu erwarten ist) und Q hergestellt ist:

$$T(Q) = \frac{1}{1-F(Q)} \quad (6)$$

Das Computerprogramm drückt neben Q , $f(Q)$ und $F(Q)$ auch $T(Q)$ aus. Das Ergebnis zeigt Abb. 3 in halblogarithmischer Darstellung.

6. Schlußbetrachtung

Eine vollständige Übereinstimmung zwischen empirischen und mathematischen Kurven in Abb. 2 und Abb. 3 ist auch bei der besten Verteilungsfunktion nicht zu erwarten. Insbesondere im oberen Ast der T-Q-Beziehung laufen beide Kurven zwangsläufig auseinander: Für den vorletzten empirischen Wert erhält man

$$T(92) = \frac{1}{1-\bar{\Phi}(92)} = 125 \text{ Jahre},$$

da aber $\bar{\Phi}(Q \geq 94) = 1$ ist, wird $T(Q \geq 94)$ bereits unendlich.

Dennoch ist eine genauere Bestimmung der Regressionslinie $f(Q)$ bei Beachtung von sekundären Minima, die durch den abfallenden Ast von $\varphi(Q)$ entstehen, möglich. Dies soll in einer Fortsetzung dieser Arbeit geschehen, wobei noch eine Reihe weiterer Pegel und Verteilungsfunktionen einbezogen und die Ergebnisse mit dem Verfahren von FOSTER/GUMBEL verglichen werden sollen.

Was den Gültigkeitsbereich der Q-T-Beziehung für großes T angeht, so sei auf eine neue Arbeit von LIEBSCHER [7] hingewiesen. Eine Extrapolation der Kurve bis zum 1000jährigen Hochwasser ist danach ohne Bedenken angebracht, vorausgesetzt, es liegt eine Meßreihe mit vergleichbaren Werten vor; die neuen Verfahren der Homogenisierung und Ergänzung von Meßreihen haben diese Bedenken weitgehend gegenstandslos gemacht.

Abschließend sei der Deutschen Forschungsmeinschaft für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit gedankt.

Literatur

1. Elderton, W. P.: Systems of Frequency Curves. Cambridge University Press, 1969 (Mit einer umfassenden Zusammenstellung der Arbeiten von K. Pearson)
2. Foster, H. A.: Theoretical Frequency Curves and their Application to Engineering Problems. Transactions of the American Society Engineers, Vol. 87 (1924), S. 142-173
3. Gumbel, E. J.: Statistics of Extremes. Columbia University Press, New York, 1966
4. Mandel, H.: Diskussionsbeitrag. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 13. Jg., H. 6, 1969, S. 166-167
5. Mandel, H.: Die Verteilung der Häufigkeiten von Abflüssen in deutschen Einzugsgebieten. Noch unveröffentlicht
6. Sangal, B. P. und Biswas, A. K.: The 3-Parameter Lognormal Distribution and its Applications in Hydrology. Water Resources Research, Vol. 6, No. 2, 1970, S. 505-515
7. Liebscher, H. J.: Hochwasserwahrscheinlichkeit. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 14. Jg., H. 4, 1970, S. 103-110

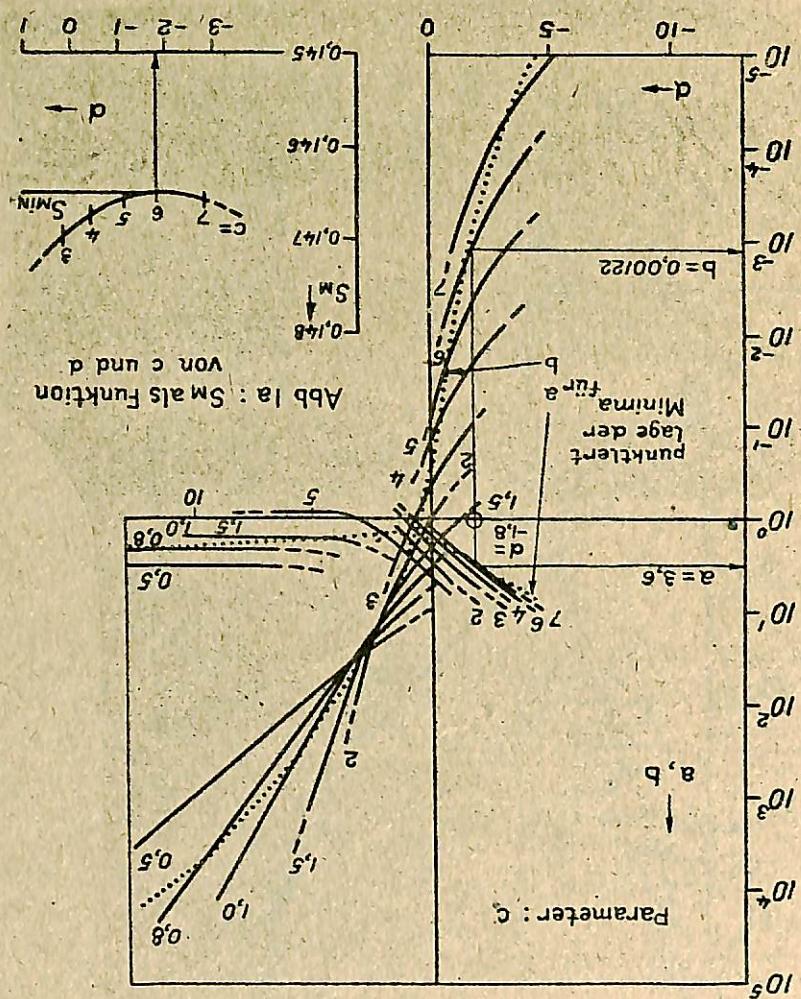


Abb 1a : Smals Funktion
von c und d

Abb 1 b : Regressionskoeffizienten

Abb 2: Verteilungsdichte und -funktion.

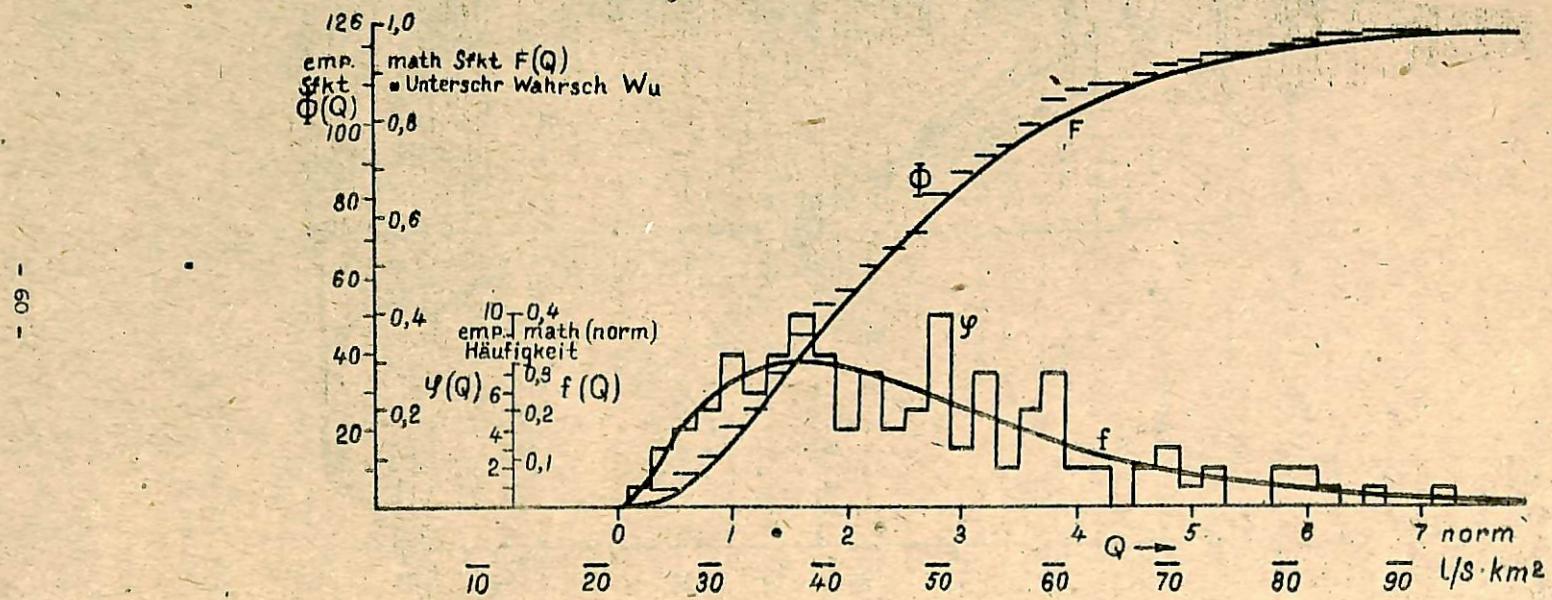
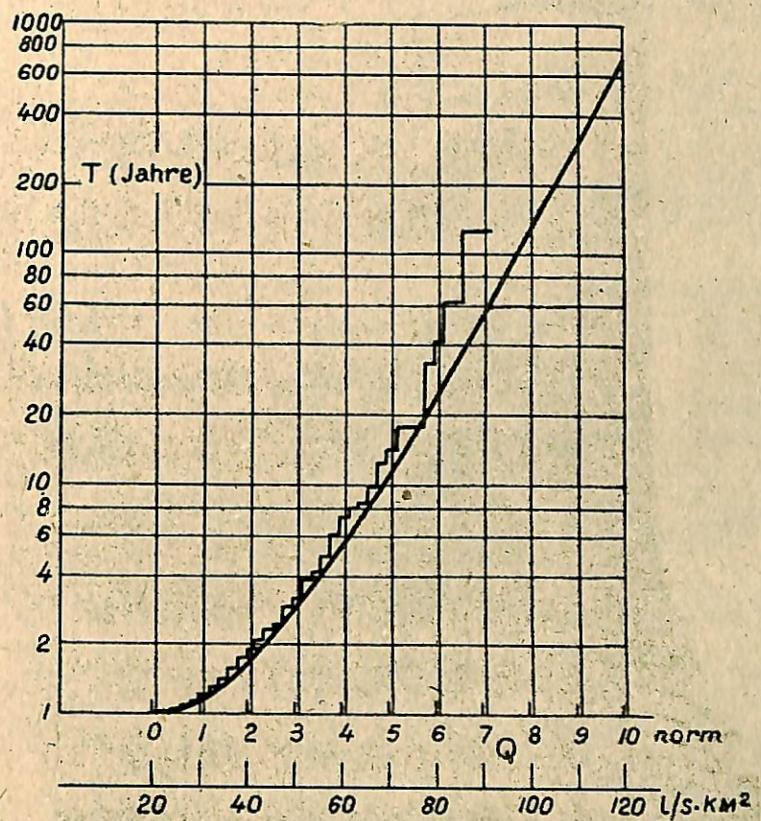


Abb 3: Wiederkehrintervall



ABFLUSSW. KELHEIM

A-B-UND V-WERTE

2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85	2.90	2.95	3.00	3.05	3.10	3.15
3.09	3.12	3.15	3.18	3.21	3.24	3.27	3.30	3.33	3.36	3.39	3.42
3.45	3.48	3.51	3.54	3.57	3.60	3.63	3.66	3.69	3.72	3.75	3.78
3.80	3.84	3.88	3.92	3.96	4.00	4.04	4.08	4.12	4.16	4.20	4.24
4.00	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.60	4.70	4.80	4.90	5.00	5.10
4.40	4.50	4.60	4.70	4.80	4.90	5.00	5.10	5.20	5.30	5.40	5.50
-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.
-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.
2.12	2.16	2.20	2.24	2.28	2.32	2.36	2.40	2.44	2.48	2.52	2.56
I.56	I.58	I.60	I.62	I.64	I.66	I.68	I.70	I.72	I.74	I.76	I.78
I.17	I.18	I.19	I.20	I.21	I.22	I.23	I.24	I.25	I.26	I.27	I.28
0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97
0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.77
0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60
-0.	-0.	-0.	80.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.
-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.
-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.	-0.
0.1984I	0.31746	0.23810	0.31746	0.39683	0.31746	0.15873	0.27778	0.15873	0.1984I	0.39683	0.II905
0.27778	0.07937	0.07937	0.	0.07937	0.II905	0.03968	0.07937	0.	0.07937	0.07937	0.27778
0.	0.	0.03968									0.07937

B= 1.00

D= -1.400 C= 6.00

B== 0.002120 0.002160 0.002200 0.002240 0.002280 0.002320 0.002360 0.002400 0.002440 0.002480 0.002520 0.002560

2.600	0.I499478	0.I503601	0.I509318	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2.650	0.I488024	0.I490392	0.I494381	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2.700	0.I480133	0.I480768	0.I483052	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2.750	0.I475641	0.I474568	0.I475168	0.I477379	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2.800	0.I474397	0.I471637	0.I470577	0.I47152	0.I473303	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2.850	0.I476254	0.I471831	0.I469152	0.I468092	0.I468652	0.I470753	0.	0.	0.	0.	0.
2.900	0.I481074	0.I475011	0.I470694	0.I468062	0.I467051	0.I467604	0.I469665	0.	0.	0.	0.
2.950	0.	0.	0.I475153	0.I470927	0.I468367	0.I467392	0.I467947	0.I469977	0.I473429	0.I478254	0.I484403
3.000	0.	0.	0.	0.I482321	0.I476564	0.I472473	0.I469990	0.I469058	0.I469622	0.I471629	0.I475029
3.050	0.	0.	0.	0.I492139	0.I484851	0.I479251	0.I475279	0.I472878	0.I471994	0.I472573	0.I474566
3.100	0.	0.	0.	0.	0.I488585	0.I483143	0.I479292	0.I476978	0.I476147	0.I476749	0.I478734
3.150	0.	0.	0.	0.	0.1500366	0.I493473	0.I488192	0.I484465	0.I482242	0.I481469	0.I482099

D= -1.600 C= 6.00

B== 0.001560 0.001580 0.001600 0.001620 0.001640 0.001660 0.001680 0.001700 0.001720 0.001740 0.001760 0.001780

3.090	0.I47II62	0.I470677	0.I47I066	0.I472306	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.120	0.I47021I	0.I469I44	0.I468846	0.I469406	0.I470803	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.150	0.I470455	0.I468589	0.I46761I	0.I467496	0.I468225	0.I469775	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.180	0.I471539	0.I468990	0.I467335	0.I466551	0.I466617	0.I467510	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.210	0.I473549	0.I470323	0.I467997	0.I466548	0.I465955	0.I466197	0.I467252	0.	0.	0.	0.	0.
3.240	0.I476464	0.I472565	0.I469573	0.I467464	0.I466218	0.I465812	0.I466226	0.I46744I	0.	0.	0.	0.
3.270	0.I480260	0.I475694	0.I47204I	0.I469278	0.I467382	0.I466334	0.I46611I	0.I466695	0.I468066	0.	0.	0.
3.300	0.	0.	0.I475380	0.I471966	0.I469427	0.I467740	0.I466886	0.I466844	0.I467594	0.I469II8	0.I47I396	0.I4744II
3.330	0.	0.	0.I479567	0.I475509	0.I472330	0.I470010	0.I468529	0.I467865	0.I467999	0.I4689I3	0.I470587	0.I473004
3.360	0.	0.	0.I484584	0.I479885	0.I476072	0.I473I24	0.I471019	0.I469738	0.I46926I	0.I469569	0.I470643	0.I472465
3.390	0.	0.	0.	0.	0.I480633	0.I47706I	0.I474338	0.I472444	0.I472360	0.I471066	0.I471544	0.I472775
3.420	0.	0.	0.	0.	0.I485993	0.I48180I	0.I478464	0.I475962	0.I474275	0.I473384	0.I473270	0.I473915

D= -1.800 C= 6.00

B==	0.00II70	0.00II80	0.00II90	0.00I200	0.00I210	0.00I220	0.00I230	0.00I240	0.00I250	0.00I260	0.00I270	0.00I280
-----	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

3.450	0.I468825	0.I468855	0.I469320	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.480	0.I467910	0.I467474	0.I467476	0.I467910	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.510	0.I467839	0.I466940	0.I466484	0.I46646I	0.I466864	0.I467687	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.540	0.I468593	0.I467236	0.I466323	0.I465846	0.I465799	0.I466175	0.I466965	0.	0.	0.	0.	0.
3.570	0.I470155	0.I468342	0.I466976	0.I466049	0.I465554	0.I465483	0.I465834	0.I466594	0.	0.	0.	0.
3.600	0.I472516	0.I470248	0.I468424	0.I467450	0.I46611I	0.I46560U	0.I465510	0.I465834	0.I4666565	0.	0.	0.
3.630	0.I475628	0.I472913	0.I470650	0.I468832	0.I467452	0.I466502	0.I465976	0.I465866	0.I466167	0.I466870	0.	0.
3.660	0.	0.	0.I473637	0.I471379	0.I469560	0.I468174	0.I467215	0.I466675	0.I466547	0.I466826	0.I467504	0.I468574
3.690	0.	0.	0.I477368	0.I474672	0.I472418	0.I470600	0.I469210	0.I468243	0.I467690	0.I467546	0.I467804	0.I468457
3.720	0.	0.	0.I481826	0.I478695	0.I476009	0.I47376I	0.I471945	0.I470553	0.I469578	0.I469014	0.I468855	0.I469094
3.750	0.	0.	0.	0.	0.I480318	0.I477644	0.I475403	0.I473589	0.I472195	0.I471215	0.I47064I	0.I470468
3.780	0.	0.	0.	0.	0.I485329	0.I48223I	0.I479569	0.I477336	0.I475526	0.I474132	0.I473146	0.I472564

D= -2.000 C= 6.00

B==	0.000860	0.000870	0.000880	0.000890	0.000900	0.000910	0.000920	0.000930	0.000940	0.000950	0.000960	0.000970
-----	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

3.800	0.I47II48	0.I469926	0.I469586	0.I470107	0.I471472	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.840	0.I47I390	0.I469322	0.I468142	0.I467832	0.I46837I	0.I469742	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.880	0.I47294I	0.I470036	0.I468025	0.I466889	0.I466610	0.I467168	0.I468547	0.	0.	0.	0.	0.
3.920	0.I475767	0.I47205I	0.I469I96	0.I467243	0.I466152	0.I465906	0.I466486	0.I467874	0.	0.	0.	0.
3.960	0.I47983I	0.I475273	0.I47I62I	0.I468858	0.I466963	0.I465918	0.I465706	0.I466309	0.I467709	0.	0.	0.
4.000	0.I485I00	0.I479727	0.I475266	0.I47I700	0.I469008	0.I467I72	0.I466175	0.I465999	0.I466626	0.I468039	0.	0.
4.040	0.I49154I	0.I485360	0.I480098	0.I475735	0.I472253	0.I469634	0.I467858	0.I466909	0.I466770	0.I467423	0.I46885I	0.
4.080	0.	0.	0.I486I83	0.I480932	0.I476668	0.I47327I	0.I470724	0.I469009	0.I468I09	0.I468008	0.I468688	0.I470I33
4.120	0.	0.	0.I493I92	0.I487260	0.I482219	0.I478052	0.I474740	0.I472266	0.I470613	0.I469763	0.I46970I	0.I470409
4.160	0.	0.	0.I50I393	0.I494687	0.I488878	0.I483947	0.I479877	0.I47665I	0.I474250	0.I472659	0.I47186U	0.I471838
4.200	0.	0.	0.	0.	0.I496613	0.I490926	0.I486I05	0.I482I32	0.I47899I	0.I476664	0.I475I35	0.I474388
4.240	0.	0.	0.	0.	0.I505397	0.I498960	0.I493395	0.I488683	0.I484807	0.I48I75I	0.I479498	0.I478032

D= -2.200 C= 6.00

B==	0.000660	0.000670	0.000680	0.000690	0.000700	0.000710	0.000720	0.000730	0.000740	0.000750	0.000760	0.000770
-----	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

4.000	0.I487533	0.I49I793	0.I497637	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4.100	0.I47542I	0.I476815	0.I479822	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4.200	0.I47I190	0.I469776	0.I470005	0.I47I83I	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4.300	0.I474344	0.I47U184	0.I467692	0.I466822	0.I46753I	0.I469775	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4.400	0.I484425	0.I477576	0.I472420	0.I468912	0.I467006	0.I466660	0.I467832	0.I47048I	0.	0.	0.	0.	0.
4.500	0.I50I00I	0.I49I523	0.I48376I	0.I477668	0.I473202	0.I47U318	0.I468976	0.I469I34	0.I470754	0.	0.	0.	0.
4.600	0.I523669	0.I5II62I	0.I50I309	0.I492688	0.I4857I4	0.I480345	0.I476539	0.I474256	0.I473456	0.I474I00	0.I476I5I	0.	0.
4.700	0.	0.	0.	0.I524688	0.I5I3593	0.I504I65	0.I496362	0.I490I42	0.I485466	0.I482294	0.I480587	0.I480308	I48I42I
4.800	0.	0.	0.	0.I553544	0.I540030	0.I52820I	0.I5I8015	0.I509432	0.I5024I1	0.I4969I4	0.I49290I	0.I49U537	I489I84
4.900	0.	0.	0.	0.I587543	0.I57I664	0.I557487	0.I544970	0.I534073	0.I524756	0.I5I6980	0.I5I0708	0.I505903	I502527
5.000	0.	0.	0.	0.	0.I59I710	0.I576913	0.I563752	0.I552I87	0.I542180	0.I533693	0.I52669I	I52II36	
5.100	0.	0.	0.	0.	0.I630577	0.I6I355I	0.I598I74	0.I584409	0.I5722I7	0.I56I56I	0.I552406	I5447I4	

D= -2.400 C= 6.00

B==	0.000490	0.000500	0.000510	0.000520	0.000530	0.000540	0.000550	0.000560	0.000570	0.000580	0.000590	0.000600
-----	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

4.400	0.I485I68	0.I484656	0.I487267	0.I492889	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4.500	0.I482138	0.I477809	0.I476650	0.I478548	0.I483393	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4.600	0.I485940	0.I477874	0.I47502T	0.I47I269	0.I472508	0.I476634	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4.700	0.I496I68	0.I484446	0.I475977	0.I47U648	0.I468352	0.I468984	0.I472444	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4.800	0.I5I2443	0.I497I45	0.I485I35	0.I476303	0.I47U542	0.I467749	0.I467822	0.I477664	0.	0.	0.	0.	0.
4.900	0.I534407	0.I5I56I2	0.I500I39	0.I487877	0.I478722	0.I472570	0.I46932I	0.I468879	0.I47II50	0.I476042	0.	0.	0.
5.000	0.I56I726	0.I539514	0.I520652	0.I505034	0.I492554	0.I483III	0.I476605	0.I47294I	0.I472025	0.I473767	0.I478079	0.	0.
5.100	0.	0.	0.I54636I	0.I527458	0.I5I1723	0.I499055	0.I489557	0.I482532	0.I478489	0.I477I38	0.I478390	0.I482I63	
5.200	0.	0.	0.I576964	0.I564849	0.I535925	0.I520I83	0.I507276	0.I497353	0.I490242	0.I485854	0.I484I03	I484904	
5.300	0.	0.	0.I6I2I79	0.I586925	0.I564889	0.I545972	0.I530080	0.I5I7I20	0.I507000	0.I499633	0.I494933	I492815	
5.400	0.	0.	0.	0.	0.I598336	0.I576395	0.I557502	0.I54I566	0.I528497	0.I5I8208	0.I5I06I3	I505629	
5.500	0.	0.	0.	0.	0.I6360I9	0.I6IIII9	0.I589289	0.I570439	0.I554479	0.I54I324	0.I530889	I523092	

STOCHASTIC TREATMENT FOR FORECASTING CHANGES IN STORAGE WATER LEVEL WITH SEASONAL BALANCING

S.OPRICOVIĆ, B.DJORDJEVIĆ

"Jaroslav Černí" Institute for Development
of Water Resources, Beograd, SFRY

Р е з ю м е

Интенсивное строительство водохранилищ начинает влиять на традиционный подход к долгосрочным гидрологическим прогнозам. Наряду с долгосрочными прогнозами притока воды в водохранилище, существенным становится и вопрос определения вероятности элементов режима водохранилища (уровни или емкости) в течение года. Поэтому, помимо рассматривавшихся до сих пор гидрологических параметров, при составлении прогноза вводится новая стохастическая величина – потребление, то есть режим использования воды во времени.

В докладе рассматривается проблема определения состояния водохранилища сезонного регулирования в течение года для случая, когда известна общая емкость водохранилища. Исследуются также случайные процессы, определяющие вход в водохранилище (приток) и выход (потребление и потери). Рассматривается методика, основанная трактовкой на применении процессов Маркова, и дается результат расчета некоторого водохранилища сезонного регулирования, у которого орошение является преобладающим пользователем.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Der verstärkte Bau von Speichern beginnt seinen Einfluß auf die traditionelle Behandlung langfristiger hydrologischer Vorhersagen auszuüben. Neben den langfristigen Voraussagen des Zuflusses von Wasser in den Speicher, beginnt auch die Frage einer Bestimmung der Wahrscheinlichkeit von Elementen des Speicherregimes (Wasserstand oder Fassungsvermögen) im Laufe des Jahres an Bedeutung zu gewinnen. Deswegen wird, neben den bisher geführten Untersuchungen hydrologischer Kennzahlen, bei Erstellung der Vorhersage ein neuer stoхastischer Wert – der Verbrauch, d.h. ein Regime der Verwendung von Wasser in der Zeit, eingeführt.

scher Wert – der Verbrauch, d.h. ein Regime der Verwendung von Wasser in der Zeit, eingeführt.

Im Referat wird das Problem der Bestimmung des Zustandes des Jahresspeichers im Laufe des Jahres für den Fall, daß das Gesamtfassungsvermögen des Speichers bekannt ist, untersucht. Es werden auch Zufallsprozesse, die den Eintritt in den Speicher (Zufluß) und den Austritt (Verbrauch und Verluste) bestimmen, erforscht. Es wird die Methodik untersucht, die sich auf die Anwendung der Markow'schen Prozesse gründet und das Ergebnis der Berechnung eines bestimmten Jahresspeichers, bei dem die Bewässerung als vorwiegender Nutzniederer erscheint, angeführt.

S u m m a r y

The rapid construction of storage reservoirs has started to influence the traditional approach to the long-term hydrological forecasting. In addition to the long-term forecasting of storage water inflow it is equally important to determine the probability of state (level or volume) of a storage reservoir throughout the year. Thus in addition to the so far considered hydrological parameters, a new stochastic magnitude – the consumption, i.e. utilization of water as a function of time – has been introduced into forecasting analyses.

The paper deals with a problem of determining, during a year, the storage state of seasonal balancing for a case when the total storage capacity is known. Random processes are also determined which define storage input (inflow) and output (consumption and loss). The methods based on the

Markoff's treatment of the process have been considered demonstrating calculation result for a storage of seasonal balancing used mostly for irrigation.

Introduction and assumptions.

Building of storage has become of late one among the fields of human activity with the most dynamic rate of growth. The rapid rate at which new storage reservoirs have been constructed is a result of two diametrical processes : 1) water consumption and usage increase rapidly in all fields of water utilization and human activity; 2) there is a downward trend in available qualitative water resources. This is the reason why recently the need of water can be satisfied only by building reservoirs, due to which it is possible to distribute flow in terms of time and space so as to meet the demands of consumption.

Storage building, which alters rapidly the former hydrographic and hydrologic relations in river basins, changes to a certain extent the traditional approaches to hydrological forecasting. In such a situation, the "philosophy of forecasting" encounters two important problems:

1. It is necessary to grasp to what extent numerous artificial structures within a watershed affect the methods, precision and theoretical approach to hydrological forecasting
2. Storage of water and its consumption, i.e. utilization of water as a function of time must be introduced into forecasting analyses.

Under the conditions of existence of storage reservoirs which by their backwater cover the whole stretches of a watercourse, the problem of long-term hydrological forecasting obtains a new aspect: in addition to the long-term forecasting of the water inflow into a storage it is equally important to determine the probability of state of a storage reservoir. (Under the term "state" the level or volume in a useful storage space during a time period is understood.)

The hydrological series of mean monthly discharges has become known after hydrological observations of long standing. For the same time period storage consumption and its rates have been determined by using one of the methods of water-management balances. On the basis of the analyzed water inflow and consumption and the desired functioning of the system the total storage capacity has been determined so that in this calculation it is treated as a known value. However, having in view the stochastic character of the inflow and consumption,

the state of storage (volume of available water) is also a random magnitude. Since the state of a storage at the end of time interval $t + \Delta t$ depends only on the state at the beginning of that interval t and on the inflow and consumption at the same time interval Δt , the change of state in a storage reservoir may be treated as the Markovian process. For the known random processes of storage water inflow and consumption of state probabilities of storage reservoir for the whole year may be determined if the total storage capacity is known. Considering the significance of the problem the paper will dwell on a calculation method.

Method for Determination Storage State Probability

If the water inflow in a storage is expressed by a random function $Q(t)$, and all storage loss by function $q(t)$, then the change in state of the storage reservoir is given by the following balance equation:

$$\frac{dV}{dt} = Q(t) - q(t) \quad (1)$$

Where: V - storage water volume (hereinafter "state of storage").

If a new variable is introduced

$$y(t) = Q(t) - q(t)$$

then the equation (1) is reduced to the following form:

$$\frac{dV}{dt} = Y(t) \quad (2)$$

By integration of equation (2) one obtains:

$$V(t + \Delta t) = V(t) + \int_t^{t + \Delta t} y(t) dt$$

or

$$V(t + \Delta t) = V(t) + y(t) \quad (3)$$

Where:

$$y(t) = \int_t^{t + \Delta t} y(t) dt$$

In equation (3) $V(t + \Delta t)$ represents the state of storage at the end of time interval Δt , whereas $V(t)$ the state at the beginning of the same interval.

The time period t may be chosen so that the time interval Δt represents a month, so the calculation being reduced to determining probability of state per months (at the end, at the beginning of each month). In order to speed up the calculation, discretion and normalization of the volume and value $Y(t)$ is performed through the following relations:

$$V(t + \Delta t) = \left[\frac{V(t + \Delta t)}{\Delta V} \right]$$

$$V(t) = \left[\frac{V(t)}{\Delta V} \right]$$

$$Y(t) = \left[\frac{Y(t)}{\Delta V} \right]$$

The bracket denotes that the nearest integer is taken for the transformed value.

By the mentioned transformation method the interval

$$(0, \max(V(t), Y(t)))$$

has been reduced to a certain number of points; this number depends on the value of the adopted norm ΔV .

After the transformation, equation (3) has the following form:

$$V_{t+1} = V_t + Y_t \quad (4)$$

The following symbols are introduced:

$$R_{vo} = \min V_t \text{ (lowest storage level)}$$

$$R_{vm} = \max V_t \text{ (highest storage level)}$$

$$R_{y+} = \max Y_t \text{ for } Y_t \geq 0$$

$$R_{y-} = \min Y_t \text{ for } Y_t < 0$$

The problem of determining storage state probability may be approached to by searching for an answer to the following question: What is the probability that V_{t+1} be r , where r denotes any state of storage except that of overflow or empty reservoir.

Let us consider the question by analizing equation (4):

$$V_{t+1} = r, \text{ if } V_t + Y_t = r$$

$$V_t + Y_t = r, \text{ if } V_t = s \text{ and } Y_t = r - s$$

$$(\text{where } s = R_{vo}, R_{vo} + 1, \dots, R_{vm})$$

On the basis of the mentioned possibilities, the required probability is:

$$P(V_{t+1} = r) = \sum_{S=R_{vo}}^{R_{vm}} P(V_t = s) \cdot P(Y_t = r - s) \quad (5)$$

$$(\text{here } r = R_{vo} + 1, R_{vo} + 2, \dots, R_{vm} - 1)$$

The probability of the lowest level is reached by the following consideration:

$$V_{t+1} = R_{vo}; \text{ if } V_t + Y_t = R_{vo}$$

$$V_t + Y_t = R_{vo}; \text{ if } V_t = s \text{ and } Y_t = -u$$

$$\text{where: } u = s - R_{vo}, s - R_{vo} + 1, \dots, R_{y-}$$

$$s = R_{vo}, R_{vo} + 1, \dots, R_{vm}$$

Henceforth:

$$P(V_{t+1} = R_{vo}) = \sum_{S=R_{vo}}^{R_{vm}} P(V_t = s) \cdot \sum_{u=s}^{R_{y-}} P(Y_t = R_{vo} - u)$$

For the highest level it is possible to establish the following relations:

$$V_{t+1} = R_{vm}; \text{ if } V_t + Y_t = R_{vm}$$

$$V_t + Y_t = R_{vm}; \text{ if } V_t = s; Y_t = u$$

$$\text{where: } u = R_{vm} - s, R_{vm} - s + 1, \dots, R_{y+}$$

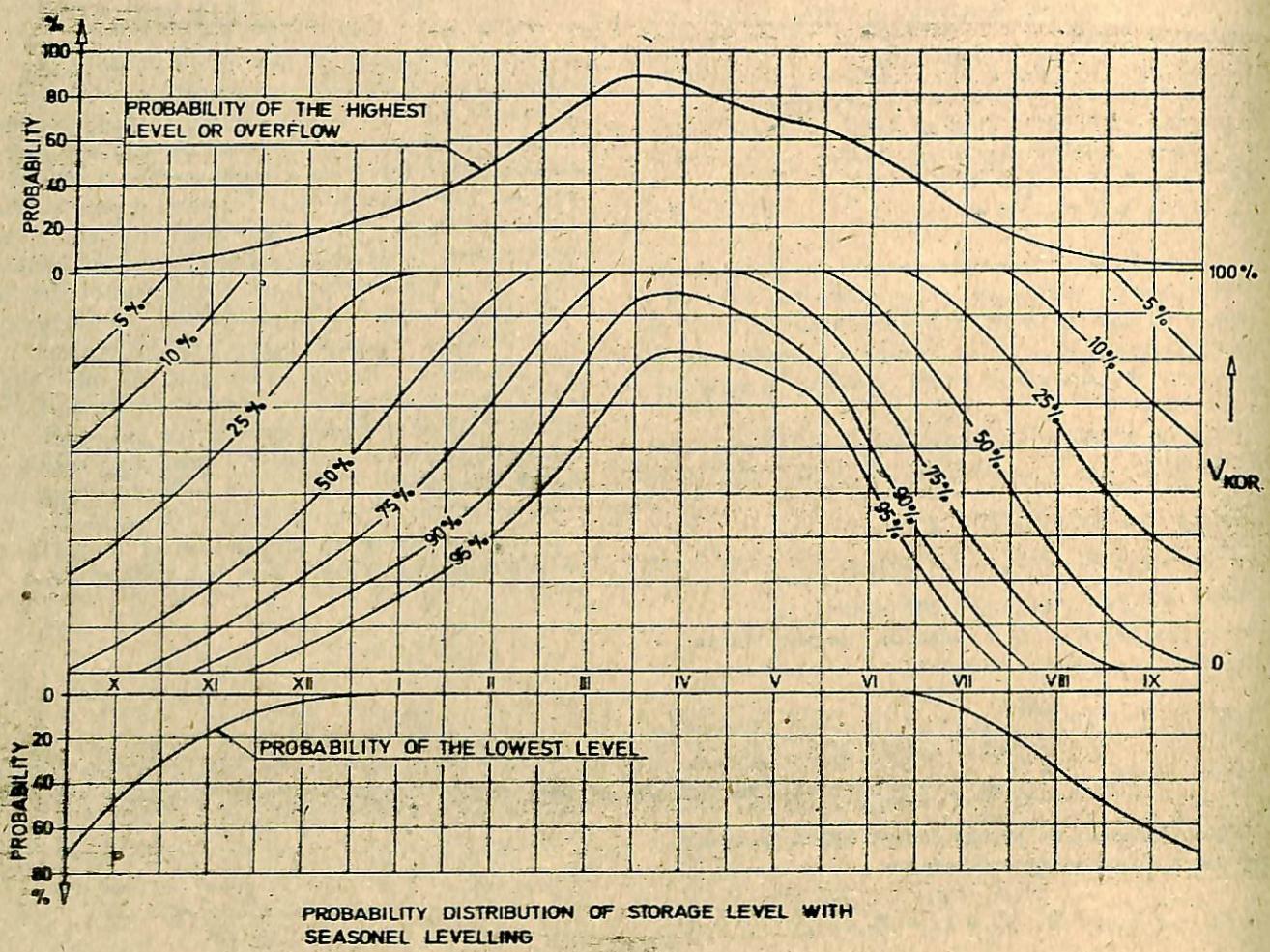
$$s = R_{vo}, R_{vo} + 1, \dots, R_{vm}$$

In this manner it follows that:

$$P(V_{t+1} = R) = \sum_{S=R_{vo}}^{R_{vm}} P(V_t = s) \sum_{u=R_{vm}-s}^{R_{y+}} P(Y_t = u)$$

For probabilities of state in a given time cross-section (the most convenient being the beginning of the hydrological year) random magnitudes may be adopted representing initial values for the mentioned iterative procedure. The analized examples show that it is irrelevant which initial state one starts from since after a number of iteration cycles (corresponding to a hydrological year) results get stabilized giving always the same distribution state of probability in the course of a hydrological year. Consequently, it means that for a given magnitude of total storage capacity, the final distribution state of probability depends only on random input-output processes. The method can also be applied together with synthetic series simulated by one of the Monte Carlo methods.

As an illustration Appendix 1 shows the distribution of the state of probability of a smaller storage reservoir mostly used for irrigation.



ТЕРРИТОРИАЛЬНО ОБЩИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПАВОДЧНОГО СТОКА РЕК ВОСТОЧНЫХ КАРПАТ

Н.Ф.БЕФАНИ

Гидрометеорологический институт,
Одесса, СССР

Р е з и м е

Восточные Карпаты можно рассматривать как единый регион паводочного стока. Генетический анализ формирования паводков в Карпатах и обобщение материалов наблюдений и экспериментов позволяют получить территориально общие зависимости, определяющие потери и слои паводочного стока. Это делает возможным предвычисление максимальных расходов паводков.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die östlichen Karpaten können als eine einheitliche Hochwasserablaufregion betrachtet werden. Eine genetische Analyse der Entstehung von Hochwässern in den Karpaten und die Verallgemeinerung der Beobachtungsergebnisse und der Versuche ergeben territorial-gemeinsame Abhängigkeiten, die die Hochwasserverluste und die Höhe des Hochwassers bestimmen. Dies ermöglicht die Vorausberechnung maximaler Hochwasserablüsse.

S u m m a r y

The East Carpathians can be considered as a uniform storm runoff region. Genetical analysis of storm runoff formation in the Carpathians and generalization of surface network observations and experimental data allow to establish territorially generalized relationships determining losses and depth of storm runoff. This enables to forecast maximum storm runoff discharges.

Паводочный сток, несмотря на большое многообразие процессов его формирования, может быть подвергнут географическому районированию. Вполне возможно выделить обширные области с присущими им характерными сочетаниями паводкообразующих факторов и общими для всей территории особенностями формирования паводков. Так, например, отдельные горные районы, так же как и равнинные области степной, лесостепной, лесной, тундровой зон имеют свои, резко отличные друг от друга черты генезиса стока. В степной полосе паводки образуются поверхностным склоновым притоком, определяясь разностью осадков и поверхностного питания. Эти воды поверхностного стока часто именуют "подвешенными", иногда же, неточно, "ливневыми". В лесной зоне при плоском рельефе преобладающей формой склонового стока становится подпёртый поверхностный в сочетании с подпёртым внутривзванным, а на малых площадях - с ливневым стоком. Горные области характеризуются наиболее сложным генезисом паводочного стока: склоновый приток слагается несколькими видами: поверхностного и подповерхностного стока (так называемого контактного или дренажного).

Территории горных районов, так же, впрочем, как и обширные равнинные области, в зависимости от тех или иных климатических, геологических условий, почв и растительности, можно разбить на так называемые "регионы паводочного стока". Последние, помимо генетической однородности стока или типичного сочетания нескольких видов склонового притока, характеризуются также своеобразием метеорологических, почвенно-физических процессов, условий рельефа, гидрографии, следствием чего является специфичность присущей данному региону зависимости стока от его факторов, т.е. наличие так называемых региональных зависимостей.

Таким образом, регионы паводочного стока следует рассматривать как области, для которых возможно получение региональных, т.е. территориально общих прогнозистических зависимостей. По условиям формиро-

вания паводочного стока реки Восточных Карпат в первом приближении можно отнести к одному региону. В пользу этого говорит однородность генезиса обильных дождей и ливней, общность или же плавность изменения разных параметров, входящих в статистические формулы дождей и ливней, некоторое однообразие рельефа и строения долин, а самое главное - повсеместное наличие слоя рыхлых скелетных почвогрунтов, залегающих на приповерхностном относительном водонепроницаемом - скеле или глинизованный тончайший обломочных пород. Последнее и создает наиболее благоприятные условия развития контактного стока, переходящего местами в подпёртый поверхностный, и сопровождающегося выборочным подвешенным. Наряду с этим всей территории Карпат свойственна большая внутренняя неоднородность формирования паводков: на каменных россыпях (особо крутые участки) сток существует только в контактной форме; на лесистых склонах с легкой или рыхлой почвой сток обычно контактный, изредка сопровождающийся выборочным подпёрто-поверхностным; в ельниках, букняках и других древостоях с тяжелой глинистой почвой наряду с контактным развивается и подвешенный поверхностный сток; на открытых склонах и полонинах с обычно закольматированными почвенными макропорами сток почти полностью поверхностный, хотя местами он зарегулирован аллювиально-делювиальными прирусловыми рыхлыми отложениями; на крутих неустойчивых открытых склонах заметной становится и контактная составляющая. Это многообразие стока приходится рассматривать как свойство всего региона в целом, т.к. контрастность условий возможна на любом самом малом бассейне. Поэтому выделение географических подрайонов Карпат не упрощает получение территориально общих зависимостей.

Решение задачи мы видим в получении индивидуальных зависимостей для открытых и залесенных участков поверхности, как наиболее контрастных по формированию стока. Располагая такими связями, можно синтезировать расчетный паводок на любом неизу-

ченном бассейне по его общей залесенности. Ряд второстепенных интразональных факторов, таких как площади каменистых россыпей, населенных пунктов, дорог и т.п., в связи с их довольно равномерным размещением по территории, на данной стадии исследований можно учитывать косвенно — численными значениями параметров региональных зависимостей.

Сложность процессов формирования дождевых паводков, их генетическая, т.е. качественная неоднородность на разных бассейнах и даже в условиях одного бассейна — во времени, не позволяют получить надежные прогностические рекомендации методами графической и графоаналитической корреляции элементов стока с общими осадками и другими факторами стока.

С развитием теории, кибернетики и электронно-вычислительных машин большое распространение получило моделирование гидрологических процессов [5]. Под математической моделью явления понимают не просто формулировку исходных предпосылок исследуемого процесса, но и всю совокупность функций, описывающих этот процесс. Качество модели определяется той математической теорией и той системой теоретических воззрений, которые положены в ее основу. Модели формирования дождевых паводков должны вытекать из балансовых соотношений, характеризующих водообмен в естественных условиях, и из теории процессов формирования стока. Для характеристики отдельных элементов процесса или водообмена в этих моделях могут быть использованы экспериментальные материалы после их логического анализа или эмпирического обобщения. Из-за недостатка экспериментальных данных и связанной с этим неполноты теоретических представлений не всегда ясен вид функций, характеризующих отдельные компоненты явления или формирующие его процессы. В этом случае помогает, так называемый, численный эксперимент. Машинный расчет позволяет выбрать вариант исходных функций, наилучшим образом отвечающий условиям подбора (критериям качества). Получают широкое распространение также различного рода аналоговые модели, основанные на аналогии между процессами стока и движением электричества, тепла, воды в искусственных установках.

Как известно, в гидрологии всеобщее признание получил генетический метод. Этот метод, как мы полагаем, в применении к анализу столь сложного явления, как дождевые паводки, должен включать в себя следующие элементы:

1. Качественный анализ формирования паводков на склонах и в русловой сети.

2. Установление обобщенных теоретических соотношений между стоком и его факторами. При решении этой задачи можно использовать два метода: а) балансовый, определяющий суммарные значения стока, б) интегрирование дифференциальных уравнений стока, которые собственно говоря, представляют балансовые соотношения для бесконечно малых отрезков пути и времени.

3. Экспериментальные исследования отдельных элементов стока.

4. Разработку математической модели явления.

5. Обобщение результатов наблюдений и экспериментальных материалов, основанное на общих теоретических представлениях или принятой математической модели паводка. Задачей такого обобщения является вычисление параметров теоретических (модельных) выражений и, тем самым, получение расчетных формул паводков.

6. Проверку выводов на массовом материале.

При этом особенно важно сочетать различные способы исследования, используя синтетический подход и анализ, наблюдения и эксперименты. Анализ экспериментальных данных позволяет получить представление о конкретных взаимосвязях стока с действующими факторами, распределить побассейновые параметры по отдельным элементам поверхности, изучить отдельные стороны процесса, выявив тем самым ряд частных физических закономерностей.

Так, в результате обобщения материалов Закарпатской стоковой станции и полевых экспериментов с искусственным дождеванием площадок от 1 до 2000 м² были получены следующие значения коэффициентов потерь в долях от потерь на горном луге [4].

Виды поверхности	Элементы рельефа	
	горы	равнина
луг	1,0	1,45
смешанный лес	1,6	(2,2)
хвойный лес	1,3	-
лиственный лес	1,7	2,5
обработанные земли	(0,7)	1,2

Анализ формирования стока и обработка экспериментальных исследований [3] указывает на существование определенной аналогии в ходе потерь даже на участках с различным генезисом стока. Объясняется это обстоятельство наличием ряда общих черт в динамике потерь поверхностного и контактного стока, поверхностного впитывания и задержания — с одной стороны, и суммы глубинной инфильтрации в подстилающий слой и почвенного задержания — с другой стороны. Отмеченное обстоятельство позволяет, с некоторым приближением, принять для всего бассейна или даже региона единое функциональное выражение потерь, оценивая особенности впитывания и задержания в каждом бассейне или на каждом элементе поверхности соответствующими относительными коэффициентами потерь.

На горных склонах поверхностное впитывание определяет только поверхностную составляющую паводочного стока. Весь же паводочный сток (Y) зависит от почвенного задержания (H_3) и инфильтрации в подстилающий слой и связанные с ним тонко-зернистые прослойки почво-грунта во время дождя

(P_d) и спада контактных вод (P_{cn}).

$$Y = X - P_d - P_{cn} - H_3 - R = S - P_{cn}. \quad (1)$$

Здесь X — осадки; S — водообразование; R — потери на перехват растительностью. Хотя динамика перехвата и имеет некоторые свои особенности, но величина R является второстепенным компонентом баланса, что позволяет в практических расчетах рассматривать ее в сумме с поверхностным задержанием или как элемент начальных потерь на инфильтрацию.

Динамика глубинной инфильтрации может быть описана двучленной степенной функцией вида

$$K_t = \alpha_2 K_0 + \frac{\alpha_1 A_0 e^{-m J_w}}{(t+1)^n} \quad (2)$$

Здесь α_1 , α_2 — коэффициенты, учитывающие влияние типа поверхности на инфильтрацию по сравнению с поверхностью, принятой за эталонную, для которой определены параметры K_0 (установившаяся интенсивность впитывания) и A_0 ; n , m — показатели редукции убывания потерь с ростом времени t и индекса увлажнения J_w .

Формула (2) может быть использована для расчета потерь, как во время дождя, так и на спаде поверхностных и подповерхностных вод. Для этого необходимо учесть динамику площади, затопленной стекающими водами на спаде. Последняя определяется как оттоком воды от водораздела, так и попечерной ее концентрацией к склоновым тальвегам и ложбинам. Для учета неполноты затопления склона в ходе спада в формулу (2) следует ввести множитель β , представляющий собой отношение средней за время спада действительной площади затопления ко всей водосборной площади. Теоретические расчеты показали, что при определенной схематизации микрорельфа $\beta = 1/3$.

Продолжительность спада (t_{cn}) можно определить либо на основе переноса экспериментальных данных на естественные склоны, либо путем экстраполяции зависимости продолжительности спада от длины русла L на координатную ось $L = 0$. Как показал анализ, для горных условий целесообразно нормировать значения t_{cn} . Для Восточных Карпат получена относительно устойчивая величина $t_{cn} = 2,5$ суток.

Суммарные потери на почвенное задержание можно рассчитать по формуле

$$H_3 = \frac{\alpha'_1}{m'} \ln(m' x e^{-m' J_w} + 1). \quad (3)$$

Здесь α'_1 — коэффициент, учитывающий влияние растительности и сельскохозяйственного использования почв бассейна.

Определение параметров формул (2) и (3) можно осуществить различными путями. Так для Восточных Карпат они были определены на основе совместного анализа сетевых наблюдений, материалов Закарпать-

ской стоковой станции и данных специальных экспериментов. Используя соотношения между потерями на разных поверхностях, приведенные выше, можно определить значения α_1 и α_2 . Для бассейнов Карпат было получено

$$\alpha_1 = \lambda_r + 1,6 \gamma_{xr} + 2,0 \gamma_{pr} + 0,7 j_r + 1,45 \lambda_p + 2,5 \gamma_{xp} + 1,1 j_p. \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \lambda_r + \gamma_{xr} + \gamma_{pr} + 0,7 j_r + 1,45 \lambda_p + 2,5 \gamma_{xp} + 1,1 j_p. \quad (5)$$

Здесь λ_r — площади горных лугов и пастбищ в долях от общей площади; λ_p — то же для равнин; j_r , j_p — полевые земли в горах и на равнине; γ_{xr} , γ_{xp} — доли хвойных лесов в горах и на равнине ($\gamma_{xp} = 0$); γ_{pr} , γ_{lp} — то же лиственных лесов.

В формулах (4), (5) разность в инфильтрации на лугах и в лесах горных склонов целиком отнесена на α_1 , что потребовало увеличения коэффициентов в формуле (4) для горных лесов, по сравнению с указанными выше в таблице, на 20 %.

Значения других параметров определены на основе анализа экспериментальных материалов. Показатель убывания инфильтрации с ростом увлажнения $m = 0,03$, показатель редукции $n = 2/3$.

Индекс начального увлажнения рассчитывается согласно рекомендаций, изложенных в литературе [2] по формуле (61) за 30 суток. Для бассейнов Восточных Карпат были получены единые значения $A_0 = 0,67$ и $K = 0,0015$ мм/мин, что отвечает и средним значениям, полученным экспериментально на лугах.

Потери на почвенное задержание оцениваются по формуле (3) при значениях параметров $m' = 0,03$ и α'_1 по формуле (4), умноженной на региональный коэффициент 0,67. Расчет потерь и слоя паводочного стока осуществляется по отдельным тягам дождя.

Как известно, речные бассейны характеризуются большой пространственной неоднородностью факторов стока, определяющих его генезис, инфильтрацию и задержание. В силу сказанного правильнее всего определять слой стока как средний взвешенный

$$Y = \varphi_1 Y_1 + \varphi_2 Y_2 + \varphi_3 Y_3 + \dots + \varphi_n Y_n, \quad (6)$$

где через φ_i обозначены относительные коэффициенты взвешивания, которые могут быть определены по-разному, в частности, как отношения площадей с примерно одинаковыми условиями формирования стока;

Y_i — слой стока с i -й площади, определяемый по осадкам этой площади с присущими ей параметрами потерь.

Деление водосбора на участки с однородными условиями формирования приводит, как правило, к наиболее точным результатам. Особенно целесообразно выделять отдельно открытые участки с повышенным водообразованием. При отсутствии детальных данных расчет можно вести и по средним для бассейна параметрам — осадкам, средним для всего бассейна или

для отдельных его частей. В этом случае возможно занижение стока особенно низких паводков.

Таким образом, приведенные формулы позволяют определить слой водообразования S и стока Y для конкретного дождя. Знание водообразования в принципе разрешает и проблему расчета максимального расхода и гидрографа стока. Наиболее конкретно и просто этот вопрос решается для регионов с однородным генезисом стока - чисто поверхностным или целиком контактным. Так, в степной полосе, особенно на волнистой равнине, возможен прямой синтетический расчет максимального расхода и гидрографа стока по вычисленному водообразованию. Поскольку склоновое и русловое добегание достаточно изучено, то предвычисление можно выполнить даже на основании известных в литературе экспериментально теоретических формул, связывающих максимальную ординату склонового притока со слоем водообразования и индексом рельефа $[1]$. Гидрограф руслового стока определяется по функции влияния. Точнее можно решить задачу, используя данные стоковых станций. Так, по данным Богуславской станции, характеризующим волнистую равнину, получаются четкие связи максимального модуля стока с общим слоем водообразования. Для перехода к территориально общим зависимостям целесообразно определить максимальную ординату склонового притока Q_{skm} по формуле

$$Q_{skm} = \delta Q_{max}. \quad (7)$$

Здесь δ - коэффициент ретрансформации, приближенно $\delta = \frac{2T_o}{2T - t_p}$, где t_p - русловое время добегания, а T_o - основание схематизированного гидрографа склонового притока.

Обобщение локальных связей позволяет рассчитать максимальный расход любого бассейна по водообразованию. Аналогично решается задача предвычисления гидрографа. Описанная схема расчета может быть использована только в малолесных предгорьях Карпат.

В горных условиях расчет более сложен, что связано с многообразием путей стекания воды. Различия в скоростях течения по поверхности, в естественных дренах и разного рода, пластах турбулентной фильтрации создают и неодинаковые формы гидрографов разных составляющих паводка. Даже на открытых бассейнах с преобладанием поверхностного стекания обычно наблюдается более поздний и низкий максимум и значительно большая продолжительность стока, чем на равнине.

Так, по Открытому логу Закарпатской стоковой станции от ливня II/УШ 1964 г. за час стекло около 30 % общего объема паводка, в то время как по Богуславской станции при сильных ливнях часовой сток наблюдается в пределах от 40 % до 100 %. Даже за 2 часа в рассматриваемом случае стекло лишь около 40 % общего стока. Основной причиной зарегулированности поверхностного стока с открытых участков гор является аккумуляция склонового притока в прирусовой делювиальной осьме и речном аллювии. Некоторую роль играет и дренаж особо крутых склонов.

Регулирующий эффект склонового шлейфа с развитием высоты паводка снижается, а при повторных падежах - редуцируется. С ростом увлажнения и высоты паводка меняется и характер гидрографа: в своей пиковой части он приближается к гидрографам наименее зарегулированного ливневого притока с интенсивно расщепленных водосборов равнины. Наиболее сложен гидрограф на лесных склонах. Он формируется наложением друг на друга частных графиков притока, имеющих самые различные скорости добегания (по поверхности, в дренах, россыпях, пластиах щебенистого и мелкозернистого грунта). Попутно отметим, что длина собственно контактного добегания значительно меньше общей длины склона. Она широко варьирует от нулевых, или почти нулевых, значений на открытых глинистых участках до полной длины склона на полосках с очень большой мощностью рыхлых отложений. Относительная малость скоростей дренажного стока сообщает особую роль участкам контактного стока, т.к. именно их водопропускная способность лимитирует режим и определяет гидрограф общей водоотдачи склона.

Большое влияние на развитие контактного стока оказывает аккумуляция водообразования в мелкозернистой толще и отдача этих вод в дренажную сеть. В частности, анализ хода паводков в часовых интервалах показал, что максимум стока на лесных водосборах часто смещается с первого на второй, а иногда и на третий интервал времени после стокообразующей части дождя. Развитие стока при наличии мощных мелкозернистых толщ почво-грунта может тормозиться долго; чем больше аккумуляция, тем продолжительнее оказывается водоотдача на спаде.

Из сказанного вытекает непостоянство распределения во времени водоотдачи избыточных осадков, взятых за разные интервалы времени в ходе дождя. Это распределение, т.е. единичный гидрограф, для первых объемов водообразования характеризуется чрезвычайной расплывчатостью, что обусловлено аккумуляцией. Водоотдача последующих интервалов все более приближается к типовому графику стекания, нетransформированному временной аккумуляцией.

Таким образом, гидрограф стока горных рек пока трудно установить прямым синтетическим расчетом. Решение этой задачи требует подробного анализа соотношений между графиками вычисленного водообразования и наблюденными гидрографами. Размеры настоящей статьи не позволяют остановиться подробнее на вопросе о предвычислении гидрографа.

Максимальный расход представляет собой наибольшую за паводок сумму частных объемов водообразования, добегающих со склонов разными путями и объединяющихся в русло. Иначе говоря,

$$Q_{max} = f \left(\sum \mathcal{E}_{n+p} \frac{S_{n+p}}{t_{n+p}} + \sum \mathcal{E}_{k_i} \frac{S_{k_i+p}}{t_{k_i+p}} \right), \quad (8)$$

где S_{n+p} - слой водообразования за время поверхностного склонового добегания t_n в сумме с

русловым, ε_n — доля поверхностного водообразования в общем; компоненты 2-го, 3-го и т.д. членов аргумента имеют тот же смысл, но относятся к различным пластам или ярусам разных видов контактного стока.

Имеющийся экспериментальный материал пока недостаточен для прямого расчета коэффициентов ε или $\mu = \frac{\varepsilon}{t_n + t_p}$. Однако, возможны и иные пути решения задачи. Так, вычислив водообразование в ряде произвольно выбранных интервалов времени и задавшись некоторыми предположительными величинами μ , можно подобрать такие интервалы и такие коэффициенты μ , которые дадут наиболее тесную связь $Q_{max} = f(\sum \mu S)$. В качестве примера приведен такого рода зависимость для р.Пилипец в створе Подобовец ($F = 7,8 \text{ км}^2$, лесистость 12 %).

$$Q_{max} = (0,1 + 0,0027 S_{30})^2 (S_2 + 0,3 S_{3-10})^{1,15} \quad (9)$$

где S_{30} — слой водообразования максимальный за 30 минут, S_2 — то же за 2 часа; S_{3-10} — слой водообразования за интервал времени (с 3 до 10 час), предшествующий расчетному 2-х часовому интервалу.

Для нескольких малых, почти полностью залесенных водосборов получены аналогичные формулы с другими численными параметрами. Зависимости, подобные (9), решают задачу локального прогнозирования максимального расхода. Заметим, что с ростом площади бассейна и величины t_p , согласно (8), увеличиваются интервалы времени, по которым исчисляется водообразование, число же интервалов быстро сокращается до двух, а на очень больших бассейнах — даже до одного. Таким образом, расчетная зависимость трансформируется в связь между расходом и общим слоем водообразования за дождь при однотипном распределении водообразования по площади.

Задача территориального обобщения локальных зависимостей может быть решена разными способами. Простейший, но приближенный способ сводится к эмпирическому обобщению параметров однотипных связей по времени дебегания, индивидуально для открытых и лесных водосборов. Это позволяет синтезировать максимальные расходы на бассейнах разной лесистости. Для более точного предвычисления необходим расчет гидрографа притока с открытых и лесных склонов. Это позволяет рассчитать максимальный расход и гидрограф стока по генетической формуле с использованием русской функции влияния.

Расчет гидрографа склонового притока можно выполнить несколькими способами. Так, максимальные расходы по опорным лесным и безлесным бассейнам можно ретрансформировать в максимальные ординаты притока Q_{skm} . Для этого или вводится коэффициент ретрансформации σ или зависимость $Q_{max} = f(t_p)$ экстраполируется на ось до $t_p = 0$. Задавшись редукционной функцией гидрографа притока степенного или показательного вида, можно определить ее параметры по известным величинам Q_{skm} и

слою стока Y . Расчеты корректируются по увязке общей расчетной продолжительности притока T с продолжительностью русского паводка. Более точный метод заключается в ретрансформации каждого наблюденного на опорных бассейнах русского гидрографа в склоновый с последующим обобщением результатов.

Л и т е р а т у р а

1. Бефани А.Н. Новый метод расчета максимальных ливневых расходов в условиях степной полосы Украины (практическое руководство). Труды ОГМИ, вып. III, г. Одесса, 1958.
2. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Гидрометеоиздат, 1965.
3. Бефани Н.Ф., Позднякова В.Б., Тюхта К.К. Экспериментальные формулы впитывания, их применение к расчету дождевого стока с малых горных бассейнов. Труды УкрНИГМИ, вып. 69, 1967.
4. Бефани Н.Ф. Сравнительная оценка влияния растительного покрова на потерю паводочного стока (в условиях Карпат). Сб. Метеорология, климатология и гидрология. Вып. 5, 1969, Киевский Университет.
5. Международный симпозиум по паводкам и их расчетам. Ленинград 15–22 августа 1967 г. Гидрометеоиздат, 1969.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ОЦЕНКЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

П.БАРТА

Научно-исследовательский Институт Водного Хозяйства,
Будапешт, ВНР

Р е з и м е

При разработке метода гидрологических прогнозов необходимо оценить его эффективность. Для этого по исходным данным за предшествующие годы составляются проверочные прогнозы, которые и оцениваются.

В последнее время для разработки методов прогнозирования все шире используются электронно-вычислительные машины, которые дают возможность применять методы оптимизации. Эти методы в большинстве случаев основаны на получении минимальной разности между прогнозом и фактическим значением функции при разных вариантах параметров, входящих в данный метод. Однако для решения таких задач затрачивается много машинного времени, сокращение которого обеспечило бы существенный экономический эффект.

Такое сокращение машинного времени достигается применением метода последовательного анализа, который дает возможность составлять лишь столько проверочных прогнозов, сколько необходимо для того, чтобы получить среднеквадратичную ошибку проверочных прогнозов меньше заданного критерия. Приводится пример применения данного метода.

С у м м а г у

In the elaboration of forecasting methods the checking of their efficiency is indispensable. This is generally done by the evaluation of control forecasts based on a certain quantity of basic data. As the parameter of evaluation, in general, the quadratic mean error of the control forecasts is taken.

Recently the elaboration of a certain group of forecasting methods by optimization methods on electronic computer has been gaining ground. Optimization methods are generally based on searching for the minimum deviation of the result obtained, i.e. for the minimum difference between the forecasts published and the actual values, considering several variants of the parameters included in the method. In solving such tasks mechanical computation may be rather time-consuming and thus its re-

duction results in a significant saving of time.

The method of sequential analysis lends itself to performing control forecasts in a number just sufficient for deciding that the quadratic mean error of the control forecasts is smaller than the given criterion.

The application of the method is illustrated by an example.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Bei der Ausarbeitung einer Methode hydrologischer Vorhersagen muß ihre Wirksamkeit einer Bewertung unterzogen werden. Zu diesem Zweck werden nach den Ausgangswerten der vorangegangenen Jahre Kontrollvorhersagen erstellt, die auch bewertet werden.

In letzter Zeit finden bei der Erarbeitung von Methoden der Vorhersage elektronische Rechenanlagen, die eine Anwendung der Optimierungsmethode gestatten, eine stets breitere Verwendung. Diese Methoden gründen sich in ihrer Mehrzahl auf die Erlangung minimaler Differenzen zwischen der Vorhersage und dem faktischen Wert der Funktion bei verschiedenen variierenden Kennzahlen, die in der betreffenden Methode enthalten sind. Für die Lösung derartiger Aufgaben wird jedoch viel Maschinenzeit aufgewendet, deren Herabsetzung einen wesentlichen wirtschaftlichen Effekt gewährleisten würde.

Eine derartige Verminderung der Maschinenzeit wird durch Anwendung der Verfahren der Sequenzanalyse erreicht, welche die Möglichkeit der Erstellung nur so vier Kontrollvorhersagen geben, die notwendig sind, um einen mittelquadratischen Fehler der Kontrollvorhersagen zu erhalten, der niedriger als das gegebene Kriterium ist. Es wird ein Beispiel für die Anwendung dieser Methode angeführt.

Разработку методов гидрологических прогнозов нельзя считать законченной без оценки их эффективности. Часто при разработке методики прогнозов рассматриваются несколько вариантов решения, точность которых необходимо оценить для выбора наилучшего из них. С расширением применения в гидрологических прогнозах электронно-вычислительных машин (ЭВМ) все больший вес получают методы оптимизации. Характеристики эффективности предвычисления гидрологических явлений определяются приемами математической статистики, требующими достаточно длинных рядов элементов, в данном случае поверочных прогнозов.

Необходимое количество таких прогнозов в некоторых случаях может достигнуть нескольких тысяч. Уменьшение их числа сопровождается увеличением неточности в определении величины ошибки прогнозов. Однако существует такой метод математической статистики, который позволяет на основе ограниченного количества элементов определить характеристики всей совокупности. Теория его была разработана А. Вальдом [1]. Метод используется при контроле качества и приемочном контроле разного рода изделий.

Точность методов гидрологических прогнозов чаще всего характеризуется среднеквадратичной ошибкой ($\bar{\sigma}$) по линии прогнозов; чем меньше ее величина, тем точнее метод. В каждом случае можно определить такую величину $\bar{\sigma}'$, что метод считается неудовлетворительным, если $\bar{\sigma} > \bar{\sigma}'$ и удовлетворительным, если $\bar{\sigma} < \bar{\sigma}'$. Если величина среднеквадратичной ошибки находится точно на границе, т.е. $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}'$, то безразлично, будет ли этот метод квалифицироваться как удовлетворительный или как неудовлетворительный. Задача состоит в том, чтобы разработать способ проверки гипотезы, отвечающей условиям $\bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}'$.

Вообще можно задаться такими двумя границами $\bar{\sigma}_0$ и $\bar{\sigma}_1$ ($\bar{\sigma}_0 < \bar{\sigma}'$ и $\bar{\sigma}_1 > \bar{\sigma}'$), при которых классификация метода прогноза как удовлетворитель-

ного будет считаться существенной ошибкой, если $\bar{\sigma} > \bar{\sigma}_1$ и нельзя классифицировать его как неудовлетворительный при $\bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_0$.

Величина допустимого риска принятия неверного решения может быть определена следующим образом: вероятность классифицировать рассматриваемый метод прогноза как неудовлетворительный не должна превышать заданной малой величины α , если $\bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_0$, и вероятность признать его удовлетворительным не должна превышать заданной малой величины β , когда $\bar{\sigma} > \bar{\sigma}_1$.

План выборочной проверки, удовлетворяющий требованиям, касающимся величины допустимого риска, дается последовательным критерием отношений вероятностей (α, β) для проверки гипотезы $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0$ при конкурирующей гипотезе $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_1$.

Пусть X_1, X_2, X_3, \dots означают результаты последовательных наблюдений X . Плотность вероятности выборки (X_1, X_2, \dots) составляет:

$$P_m = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \bar{\sigma}^m} e^{-\frac{1}{2\bar{\sigma}^2} \sum_{i=1}^m (X_i - \theta)^2} \quad (1)$$

где среднее значение θ предполагается предполагается известным. Пусть P_{om} означает выражение, получающееся подстановкой в правую часть (1)

$\bar{\sigma}_1$ вместо $\bar{\sigma}$ ($i = 0, 1$). Последовательный критерий отношений вероятностей определяется следующим образом: на каждом этапе проверки вычисляется отношение $\frac{P_m}{P_{om}}$. Дополнительные наблюдения производятся до тех пор, пока

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \frac{P_m}{P_{om}} = \frac{\frac{1}{\bar{\sigma}_{1m}} e^{-\frac{1}{2\bar{\sigma}_{1m}^2} \sum_{i=1}^{m_1} (X_i - \theta)^2}}{\frac{1}{\bar{\sigma}_{0m}} e^{-\frac{1}{2\bar{\sigma}_{0m}^2} \sum_{i=1}^{m_2} (X_i - \theta)^2}} < \frac{1-\beta}{\alpha} \quad (2)$$

Метод считается удовлетворительным, если

$$\frac{P_{om}}{P_m} \leq \frac{\beta}{1-\alpha} \quad (3)$$

и неудовлетворительным, если

$$\frac{P_m}{P_{o,m}} > \frac{1-\beta}{\alpha} \quad (4)$$

После логарифмирования, деления на $\frac{1}{2\sigma_o^2} - \frac{1}{2\sigma_i^2}$ и упрощения, неравенство (2) превращается в следующее выражение:

$$\frac{2\ln\frac{\beta}{1-\alpha} + m\ln\frac{\sigma_i^2}{\sigma_o^2}}{\frac{1}{\sigma_o^2} - \frac{1}{\sigma_i^2}} < \sum_{i=1}^m (X_i - \theta) < \frac{2\ln\frac{1-\beta}{\alpha} + m\ln\frac{\sigma_o^2}{\sigma_i^2}}{\frac{1}{\sigma_o^2} - \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (5)$$

Для проверки, осуществляющейся на основе неравенства (5), вычисляются приемочное число

$$Q_m = \frac{2\ln\frac{\beta}{1-\alpha}}{\frac{1}{\sigma_o^2} - \frac{1}{\sigma_i^2}} + m \frac{\ln\frac{\sigma_i^2}{\sigma_o^2}}{\frac{1}{\sigma_o^2} - \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (6)$$

и браковочное число

$$\Gamma_m = \frac{2\ln\frac{1-\beta}{\alpha}}{\frac{1}{\sigma_o^2} - \frac{1}{\sigma_i^2}} + m \frac{\ln\frac{\sigma_o^2}{\sigma_i^2}}{\frac{1}{\sigma_o^2} - \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (7)$$

Приемочное и браковочное числа не зависят от исхода испытаний, поэтому они могут быть вычислены перед началом проверки. Проверка длится пока

$$Q_m < \sum_{i=1}^m (X_i - \theta)^2 < \Gamma_m \quad (8)$$

Как только $\sum_{i=1}^m (X_i - \theta)$ оказывается вне интервала между Q_m и Γ_m , проверка прекращается. Если на последнем этапе $\sum_{i=1}^m (X_i - \theta) \leq Q_m$ — метод считается удовлетворительным, если $\sum_{i=1}^m (X_i - \theta) > \Gamma_m$ — неудовлетворительным.

Практическое применение метода рассмотрим на следующем примере.

Требуется определить, являются ли эффективными прогнозы на приточном участке реки Тиссы Вашаронь-Полгар, рассчитанные на электромоделирующей установке ПР-43 без учета промежуточного притока. Для того, чтобы метод прогноза оценивался как удовлетворительный, необходимо чтобы среднеквадратичная ошибка предвычислений находилась в пределах $\sigma_o = 106 \text{ м}^3/\text{сек} < \sigma < \sigma_1 = 136 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Величину допустимого риска принимаем равной $\alpha = \beta = 0,05$. Проверка производится в следующем порядке. В начале определяются приемочные и браковочные числа. Для простоты в данном примере эти величины определены только для значений m , кратных десяти (10, 20, 30 ... и т.д.). Затем вычисляны последовательные суммы квадратов ошибок прогнозов ($\sum_{i=1}^m (\Delta Q_i)^2$).

В том случае, если значение $\sum_{i=1}^m \Delta Q_i^2$ выходит из интервала между Q_m и Γ_m проверка заканчивается. В данном случае:

$$Q_{m=10} = -25000 \quad \sum_{i=1}^{m=10} (\Delta Q_i)^2 = 162526 \quad \Gamma_m = 325000$$

$$Q_{m=20} = 125000 \quad \sum_{i=1}^{m=20} (\Delta Q_i)^2 = 392521 \quad \Gamma_{m=20} = 475000$$

$$Q_{m=30} = 275000 \quad \sum_{i=1}^{m=30} (\Delta Q_i)^2 = 698596 \quad \Gamma_{m=30} = 625000$$

Как следует из приведенных соотношений, уже при $m = 30$ значение $\sum_{i=1}^{m=30} (\Delta Q_i)^2$ больше значения $\Gamma_{m=30}$, значит гипотеза об удовлетворительности отвергается.

Для проверки полученных результатов была рассчитана среднеквадратичная ошибка всех поворочных прогнозов, число которых было 1024. Величина среднеквадратичной ошибки составляла $144 \text{ м}^3/\text{сек}$; она действительно больше верхнего предела $\sigma_1 = 136 \text{ м}^3/\text{сек}$, т.е. метод прогноза считается неудовлетворительным.

Естественно, что если наши требования будут более строгими относительно величины допустимого риска, то потребуется больше данных для проверки.

Данный метод может быть использован только в случае распределения исследуемой случайной величины, близкого к нормальному.

Л и т е р а т у р а

I. А. Вальд. Последовательный анализ. Физматиздат, 1958.

Введение

С распространением электронно-вычислительных машин (ЭВМ) все большее значение приобретают такие методы прогнозов, которые из-за расчетно-технических трудностей ранее не применялись. Однако, внедрение вычислительной техники влечет за собой определенную опасность, если к этому подходит механически. Следует учитывать, что "математика - это мельница, в жерло которой что ни насыпать, все перемелет". Поэтому, если заложить в ЭВМ исходные данные без учета физики явления, то результаты могут оказаться случайными и привести к заблуждению.

В то же время, при помощи ЭВМ, вычислительные мощности которой во много раз превышают способности человека, можно исследовать и такие подробности, которые раньше приходилось упускать из-за трудностей расчетов вручную.

Янош Нейман определил основной принцип применения вычислительных машин следующим образом: "Исследуемые явления целесообразно разбивать на процессы, более надежно и быстро вычисляемые на машинах, и процессы, лучше анализируемые человеком. Наша задача - найти наилучшую связь между ними".

В настоящем докладе излагаются несколько примеров совместного применения ручных и машинных способов расчетов в области гидрологических прогнозов.

Прогнозирование максимальных уровней паводков

После паводка 1954 года К.Сестай разработал методику прогнозирования, на основании которой венгерская гидрографическая служба составляет и до настоящего времени прогнозы максимальных паводочных уровней Дуная.

За неимением вычислительных машин прогностические зависимости определены методом графической корреляции. На совместном использовании серии по-

лученных кривых связи трех переменных и базируется методика прогнозирования.

При исследовании связей между случайными величинами в расчеты можно вводить ограниченное (до 4-5) число переменных, если расчеты вести вручную; к тому же эти расчеты весьма трудоемки, а погрешности в них почти неизбежны. Применение цифровых вычислительных машин устраняет эти трудности и ограничения. Зависимости, включающие несколько переменных, отобранных путем тщательного гидрологического анализа, наиболее целесообразно устанавливать с помощью вычислительных машин.

Со времени составления пособий по прогнозированию, разработанных в 1954-55 годы, прошло пятнадцать лет, следовательно, появилась целесообразность их переработки с использованием данных о новых паводках, прошедших за последние годы, в число которых входит и наиболее высокий за период наблюдений - паводок 1965 года. Необходимость составления новых пособий определяется и тем, что для створа главного водомерного поста у г.Бая, находящегося на левом берегу нижней части венгерского участка Дуная, прогностических зависимостей до сих пор не было разработано.

Разработка новых пособий по прогнозированию паводков на участке Дуная Дунафельвар - Мохач начата в 1968 году. Основы подхода к выбору переменных были заимствованы из труда К.Сестай. Разработка прогностических зависимостей осуществлялась на основании анализа линейной регрессии с несколькими переменными, который велся с помощью вычислительной машины.

После завершения первых исследований выяснилось, что причиной наблюдавшихся за последние годы однотипных отклонений прогнозов паводочных уровней от фактических значений является, по всей вероятности, нестационарность стокового режима на рассматриваемом участке Дуная. Такое явление вызывает необходимость частого пересмотра зависимостей, трудоемкость чего опять-таки требует применения вы-

числительных машин.

Выполненный на ЭВМ регрессивный анализ позволил выбрать параметры, отбор которых основан на некоторых принципиальных соображениях. Переменные характеризуются тем, что находятся в прямой связи со значениями прогнозируемых уровней: подъем уровня или высокий уровень на одном из верхних постов может вызвать только повышение уровней на нижерасположенных водомерных постах.

Этот факт учитывался при составлении пособий по прогнозированию вручную, но в ходе машинных расчетов были выявлены отдельные случаи, противоречащие отмеченному факту. Так, например, рассмотрим регрессивное уравнение

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_i X_i + \dots + B_n X_n, \quad (1)$$

где Y — зависимая переменная, в нашем примере максимальный уровень паводка у г. Бая;

X_1 — пик паводка на верхнем водомерном посту в день составления прогноза;

X_2, X_3, \dots, X_n — уровни воды, измеренные на остальных водомерных постах на участке Дуная одновременно с максимальным уровнем воды X_1 , наблюдавшимся на верхнем посту;

$B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$ — коэффициенты регрессии.

В этом уравнении во многих случаях получены коэффициенты регрессии с отрицательным знаком, то есть с увеличением соответствующей независимой переменной прогнозируемое значение уменьшается, что является явным противоречием с логикой, которое и заставило нас рассмотреть так называемые парциальные факторы корреляции.

Одним из крупных недостатков графических способов анализа является то, что влияние каждой отдельной независимой переменной на зависимую нельзя рассматривать в отдельности, в отрыве от остальных. В то же время парциальный (частный) коэффициент корреляции характеризует зависимость между каждой независимой и зависимой переменными, устранив влияние остальных независимых переменных.

Обратимся к формуле (2), служащей для расчета парциального коэффициента корреляции

$$\rho_{ik} = -\frac{C_{ik}}{\sqrt{C_{ii} C_{kk}}} = -\frac{R_{ik}}{\sqrt{R_{ii} R_{kk}}}, \quad (2)$$

а также формуле (3), служащей для расчета коэффициента регрессии B_{ik}

$$B_{ik} = -\frac{C_{ik}}{C_{ii}}, \text{ где } C_{ii} > 0 \quad (3)$$

Здесь C_{ik} , R_{ik} — второстепенные детерминанты, относящиеся к индексам в так называемых ковариантных и корреляционных матрицах.

Из формул (2) и (3) следует, что отрицательный коэффициент регрессии закономерно соответствует отрицательному парциальному коэффициенту корреляции. В наших исследованиях в случае отрицательных коэффициентов регрессии абсолютное значение отрицательных парциальных коэффициентов корреляции было весьма малым. Благодаря этому ясно, что имеется лишь видимая и весьма неустойчивая связь между переменными. Следовательно, в таком случае рассматриваемую независимую переменную можно, и даже нужно исключать из расчетов. Но исключение любой переменной влечет за собой необходимость повторения всей расчетной операции.

Можно предположить, что в ходе повторных расчетов и в новом уравнении, содержащем меньшее число факторов, снова появится члены с отрицательным знаком (а в наших расчетах это повторялось не раз). Это значит, что расчет придется произвести опять снова, что сопровождается дальнейшим снижением количества независимых переменных. По этой причине расчетную программу анализа регрессии целесообразно дополнить таким циклом, благодаря которому машиной производится постоянный контроль значений парциальных коэффициентов корреляции, и в случае обнаружения в числе последних отрицательных значений или, например, запрограммированных значений меньше 0,1 — исключаются автоматически соответствующие независимые переменные и расчет повторяется с меньшим числом независимых переменных. Такое корректирование программы показано на схеме (рис. I), а ведение табличной формы показано на примере в табл. I.

Средняя квадратичная ошибка прогнозов паводков за последние 15 лет, рассчитанных на основании уравнений с помощью машин, составляет 25 см, а в прогнозах, составлявшихся ранее вручную 46 см. Такая значительная разница объясняется отчасти сужением диапазона погрешностей вычислений, проводившихся при помощи ЭВМ, а отчасти учетом упомянутой нестационарности стокового режима на венгерских участках Дуная.

Учитывая отмеченные обстоятельства, нами сделаны дальнейшие поправки в технику расчетов при установлении зависимостей, используемых для ежедневного непрерывного прогнозирования.

Непрерывное прогнозирование ежедневных уровней воды

Проблему непрерывного прогнозирования уровней воды мы попытались решить также при помощи зависимостей, разработанных для уровней воды на водомерных постах, в соответствии с общепринятыми основными принципами. И для этой задачи зависимости получены анализом регрессии, выполненным с использованием вычислительной техники и согласно с уже ранее принятыми принципиальными основами — включением в расчеты всех независимых переменных исключением излишних переменных, могущих исказить зависи-

мость, учётом неустойчивого характера зависимостей и обеспечением непрерывной их коррекции (на зависимости могут влиять значительные изменения русла, происходящие во время паводков, существенные изменения шероховатости русла, происходящие за короткий интервал времени, и даже метеорологическая обстановка).

Ближайшей задачей, естественно, являлся выбор исходных данных, характеризующих гидрологические и физические условия. Подобно выбору основных зависимостей для наших пособий, служащих прогнозированию паводочных пиков расходов, и в этом случае мы базировались на расчетах, проведенных в 1955 году ручным способом. Изменения уровней $\Delta Y^{(k)}$, прогноз которых следует составить на $k = 1, 2, \dots, 7$ суток для водомерного поста у г. Бая, определены на основании уравнения, полученного расчетом линейной регрессии в зависимости от изменения уровня воды на водомерных рейках верхнего участка Дунайя и относительной высоты уровней:

$$\Delta Y^{(k)} = f(X_1, X_1^{(1)}, X_1^{(2)}, \dots, X_n, X_n^{(j)}) = B_0 + B_1 X_1 + B_2 \Delta X_1^{(1)} + B_3 \Delta X_1^{(2)} + \dots + B_{n-2} X_m + B_{n-1} \Delta X_m^{(1)} + B_n X_m^{(2)},$$

где X_i - уровень воды, наблюдавшийся в день прогноза на водомерном посту "i";

$\Delta X_i^{(j)}$ - изменение уровня, наступившее по сравнению с уровнем, наблюдавшимся за "j" суток до изменения на водомерном посту "i". При индексировании число коэффициентов больше числа водомерных постов, так как $m < n$.

Наиболее характерной особенностью рассматриваемых расчетов является то, что прогнозы составляются на основании последних данных, а зависимости определяются на основании данных за период, непосредственно предшествующий прогнозному. Величина ряда исходных данных, необходимого для определения зависимостей с достаточной точностью, установлена сроком в сто суток.

На основании данных временного ряда в сто суток выбраны 54 переменных (уровни воды X_i , наблюдавшиеся на верхних водомерных постах, и $\Delta X_i^{(j)}$ изменения уровней), нужные для того, чтобы по отдельности решить регрессивные уравнения для прогнозов на 1, 2, ..., 7 суток. По разработанной ранее для прогнозирования паводочных максимальных расходов схеме электронно-вычислительная машина, согласно запрограммированным циклам, при определении каждой из зависимостей исключает из расчетов большинство перечисленных независимых переменных. Вторая часть расчетной программы обеспечивает постоянное обновление уравнений регрессии, составляет прогнозы и отпечатывает ожидающиеся уровни воды.

Цикл, обеспечивающий обновление уравнений, действует следующим образом: на основании запрограммированных (в качестве исходных) данных за сто

суток при помощи самовыборочного цикла машина разрабатывает уравнение регрессии; при помощи этого уравнения, а также на основании уровня, наблюдавшегося на сто первый день, и данных, служащих в качестве независимых переменных, машина отпечатывает уровни, ожидающиеся на 102 ... 108 сутки.

К значениям уровня на водомерной рейке у г. Бая на сто первый день машина добавляет изменения уровня, рассчитанные по уравнению регрессии. После этого согласно программой команде машины дописывает значения уровней, наблюдавшихся на сто первые сутки и стирает с карты данные первого дня. Затем машина, благодаря самовыборочному циклу, снова определяет уравнения регрессии, на основании которых составляются прогнозы на сто вторые сутки. Диаграмма (схема) расчетной программы показана на рис. 2, а табличная форма, содержащая первые данные для вычислительной машины, показана в табл. 2.

Использование методов прогнозирования для дополнения данных

С расширением области применения электронно-вычислительной техники возникает и проблема экономичности использования машин. Значительное повышение экономичности достигается использованием разработанных одних и тех же программ для разных целей.

Данные наблюдений в количестве 40-100 значений какого-либо элемента режима, необходимые для разработки пособий по прогнозированию, можно обычно собрать за несколько лет; следовательно, эти пособия можно составить из ряда данных за сравнительно короткий период наблюдений. Если для расчета зависимости пользоваться такими независимыми переменными, связь которых с прогнозируемым элементом можно считать устойчивой, а также, если ряд данных наблюдений независимых переменных достаточно длинный, то на основании составленного для прогнозирования пособия можно удлинить короткий ряд данных наблюдений над прогнозируемым элементом, т.е. ряд значений зависимой переменной.

Регрессивное уравнение для восстановления ряда значений паводочных расходов мы рассчитывали исходя прежде всего из данных об осадках, календарных дат, показателей влажности почвы (оцениваемых по данным об осадках, выпавших за рассматриваемый период); опираясь на эти данные, как на независимые переменные, и определялось уравнение регрессии, на основании которого и соответственно длинного ряда данных об осадках можно легко составить ряд значений паводочных расходов, пригодный для статистической обработки.

При решении задач, связанных с аккумуляционными единицами, приходится удлинять временные ряды среднемесячных расходов. В таких случаях также можно успешно использовать регрессивные зависимости, разработанные для прогнозов паводков. В одном конкретном случае, при удлинении временного ряда рас-

ходов, мы учили в качестве независимых переменных данные об осадках за рассматриваемый месяц, изменения уровней грунтовых вод, наблюдавшиеся в предыдущие месяцы, а также среднемесячные температуры воздуха. Соответственно времени года календарные даты мы учитывали индексами 1, 2 и 3, которыми обозначались: 1 - месяцы зимы и ранней весны с относительно большими значениями стока, 2 - месяцы весны и раннего лета, 3 - месяцы позднего лета и осени. В отношении температур мы учитывали их абсолютные значения, чтобы алгоритм, служащий для выбора независимых переменных, можно было применять без изменения.

Таблица 1

Расчетная таблица для прогнозирования паводков

№ п. п.	Независимые переменные											Зависимая переменная Пик в Бае	
	Пик в Кремсе и одновременные уровни				Пик в Вене и одновременные уровни				Пик в Дунафельдваре и одновременные уровни				
	Кремс	Вена	...	Бая	Вена	Братислава	...	Бая	...	Дунафельдвар	Бая		
	X ₁	X ₂		X ₈	X ₉	X ₁₀		X ₁₅		X ₃₄	X ₃₅	y	

Искомые уравнения:

$$y = B_0^{(1)} + B_1^{(1)} X_1 + B_2^{(2)} X_2 + B_3^{(4)} X_3 + \dots + B_8^{(4)} X_8$$

$$B_i^{(j)} > 0$$

$$y = B_0^{(2)} + B_1^{(2)} X_9 + B_2^{(2)} X_{10} + \dots + B_7^{(2)} X_{15}$$

$$\rho_{xy} > +0,1$$

$$y = B_0^{(7)} + B_1^{(7)} X_{34} + B_2^{(7)} X_{35}$$

Условия:

Таблица 2

Расчетная таблица для непрерывного прогнозирования ежедневных уровней

№ п. п.	Независимые переменные											Зависимые переменные					
	Бая			Дунафельдвар			Кремс					Ожидаемые изменения уровня в Бае, см					
	Уро- вень	Изменение уровня	Уро- вень	Изменение уровня	Уро- вень	Изменение уровня	Уро- вень	Изменение уровня						
	X ₁	ΔX ₁ ⁽¹⁾	ΔX ₁ ⁽²⁾	X ₂	ΔX ₂ ⁽¹⁾	ΔX ₂ ⁽²⁾	ΔX ₂ ⁽³⁾	...	X ₈	ΔX ₈ ⁽¹⁾	...	ΔX ₈ ⁽⁷⁾	ΔY ⁽¹⁾	ΔY ⁽²⁾	ΔY ⁽³⁾	ΔY ⁽⁴⁾	ΔY ⁽⁵⁾

Искомые уравнения:

$$\Delta Y^{(1)} = B_0^{(1)} + B_1^{(1)} X_1 + B_2^{(1)} \Delta X_1 + B_3^{(1)} \Delta X_2 + \dots + B_m^{(1)} \Delta X_8^{(7)}$$

$$B_i^{(j)} > 0$$

$$\Delta Y^{(2)} = B_0^{(2)} + B_1^{(2)} X_1 + B_2^{(2)} \Delta X_1 + \dots + B_m^{(2)} \Delta X_8^{(7)}$$

$$\rho_{xy} > +0,1$$

$$\Delta Y^{(7)} = B_0^{(7)} + B_1^{(7)} X_1 + B_2^{(7)} \Delta X_1 + \dots + B_m^{(7)} \Delta X_8^{(7)}$$

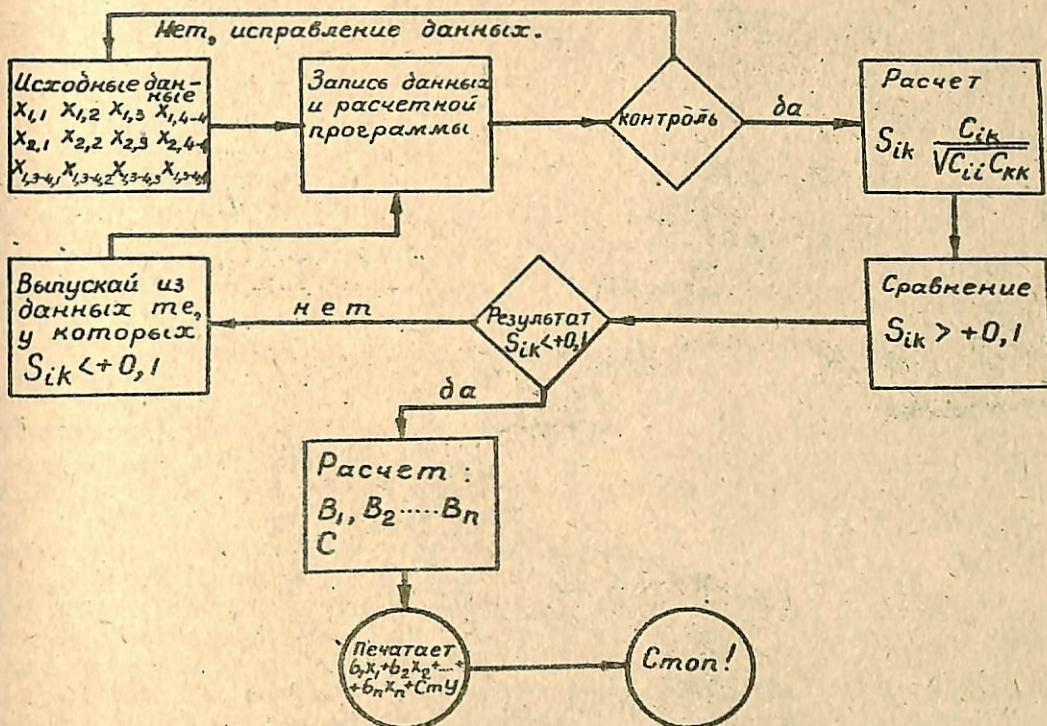


Рис.1. Схема расчетной программы для прогнозирования паводков.

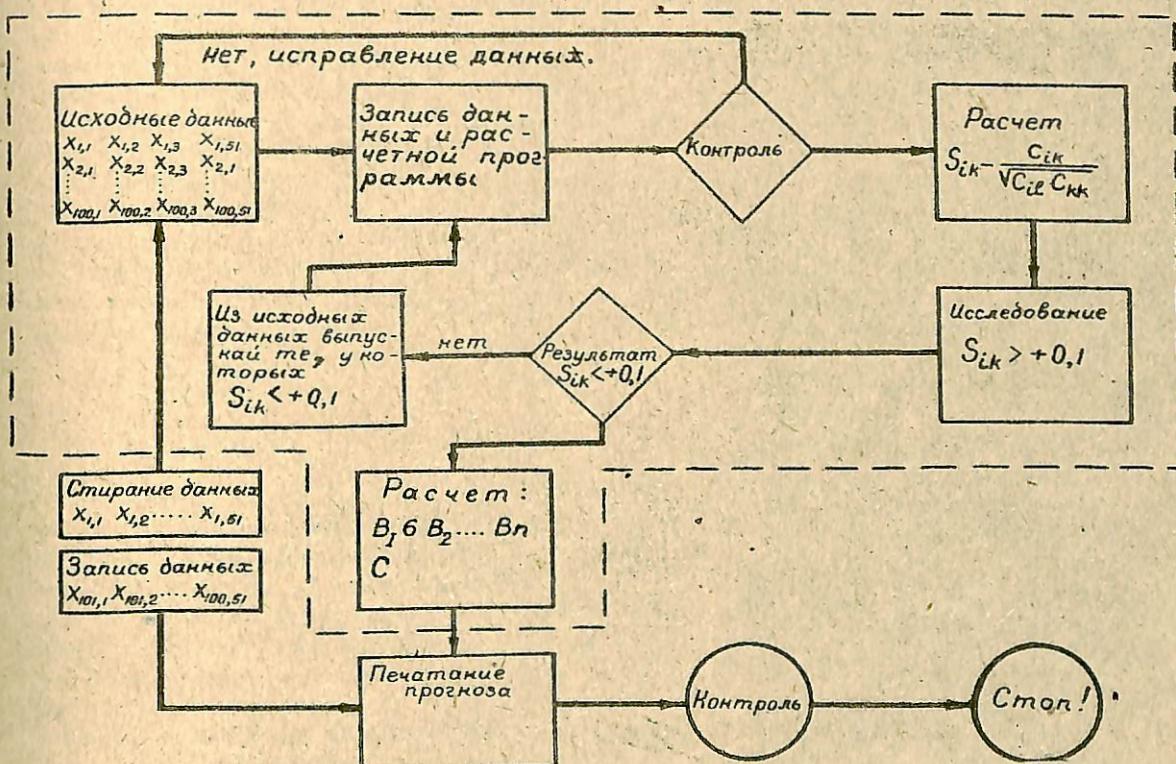


Рис.2. Схема расчетной программы для прогнозирования ежедневных уровней воды.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СТОКА ВОДЫ

О.БОНАЦЦИ

Гидрологический институт СРХ,
Загреб, СФРЮ

Р е з и м е

В докладе описывается модель долгосрочного прогноза стока, охватывающая интервал меньше года. Модель базируется на анализе естественного речного стока, как вероятностного процесса. При этом рассчитывается вероятность пути отмирания с помощью матриц переходных вероятностей. В докладе предварительно анализируется плотность и характер внутренних связей гидрологического ряда. Для исследования берется линейная и нелинейная автокорреляционная функция. В конце доклада прилагается численный пример прогноза наиболее вероятной величины.

Für die Prüfung dieser Eigenschaften ist die lineare und nichtlineare Autokorrelationsfunktion benutzt worden. Am Ende des Referates ist das numerische Beispiel angegeben.

Вступление

Долгосрочный прогноз стока воды в систему водохранилищ (средних подумесячных, месячных, сезонных, годовых величин притока и т.д.) представляет с научной точки зрения очень интересную проблему, подход и методы решения которой находятся только в периоде развития. С точки зрения современного планирования хозяйственного и экономического развития значение долгосрочного прогноза становится все более важным.

Перед учеными и инженерами находятся два совершенно противоположных подхода к решению задачи долгосрочного прогноза. Первый прием это генетический метод, т.е. решение проблемы методами параметрической гидрологии. Несколько период заблаговременности прогноза больше, настолько и влияние событий, произошедших в течение этого периода, будет более значительным. Наши исследования вследствие краткости доклада не могут быть представлены полностью, но показывают, что в промежутке несколько больше месяца влияние осадков, выпавших в течение периода заблаговременности прогноза становится настолько значительным, что практически и нельзя говорить о прогнозе стока. Проблема сводится к необходимости прогнозов осадков, выпавших в период заблаговременности, включая период, на который дается прогноз. Согласно второму подходу естественный речной сток рассматривается как вероятностный процесс. При этом надо подчеркнуть, что естественный речной сток надо считать аппаратом теории случайных процессов, а не теорией случайных событий.

В докладе показаны некоторые теоретические и практические результаты второго подхода, рассматривающего естественный речной сток, как вероятностный процесс и возможности его использования при долгосрочных прогнозах.

С у м м а г у

In this paper the model of enduring prognosis of watery quantities inflow is described, an interval less than a year, in determined profile of watercourse. The model is based on the analysis of natural watercourse as probable process. It is made the calculation of probability in which way the year dies down, with matrices of transitive probabilities. The analyses of firmness and internal relation caracter of hydrological order are made in the paper before. For examination of these characteristics, linear and non-linear autocorrelational function is used. In the end of this paper an numerical example is given.

К у р z f a s s u n g

Im Referat ist der Model der langfristigen Wasserzuflussprognose, des Intervals kleinerem als ein Jahr, im bestimmten Profil des Wasserlaufes beschrieben worden. Der Model basiert sich an der Analyse des natürlichen Flusslaufes, als dem Wahrscheinlichkeitsprozess. Es wird mit Hilfe der Matrize der Übergangswahrscheinlichkeiten die Wahrscheinlichkeit des Laufes des Jahresabsterbens berechnet. Vorhergehend sind im Referat die Festigkeits- und Charakteranalyse der inneren Bindungen der hydrologischen Ordnung durchgeführt worden.

Линейная и нелинейная автокорреляционная функция

Результаты анализа гидрологических рядов использованы для долгосрочного прогноза. Для исследования внутренней связи гидрологического ряда мы употребили линейную автокорреляционную функцию, которая определяется формулой

$$R_T = \frac{\sum_{i=1}^{N-T} (X_i - \bar{X}_i)(X_{i+T} - \bar{X}_{i+T})}{\sum_{i=1}^{N-T} (X_i - \bar{X}_i)^2 \sum_{i=1}^{N-T} (X_{i+T} - \bar{X}_{i+T})^2}$$

где R_T — коэффициент линейной автокорреляции, T — сдвиг во времени.

Нами установлено, что коэффициент линейной автокорреляции не определяет полностью внутренних связей гидрологического ряда. Вследствие этого мы приготовили программу для электронной вычислительной машины с целью расчета индекса нелинейной автокорреляции.

Расчет этого индекса невозможно провести непосредственно. Предварительно надо высчитать коэффициенты A , B , C параболической функции формулы $Y = Ax^2 + Bx + C$. Способ расчета следующий: коэффициенты A , B , C получаются из системы уравнений

$$\begin{aligned}\sum Y &= A \sum x^2 + B \sum x + C N \\ \sum XY &= A \sum x^3 + B \sum x^2 + C \sum x \\ \sum X^2 Y &= A \sum x^4 + B \sum x^3 + C \sum x^2\end{aligned}$$

Формула индекса нелинейной автокорреляции следующая

$$\begin{aligned}V_y^2 &= \frac{1}{N} \sum Y_i^2 - \bar{Y}^2 \\ IK &= \frac{V_y}{\bar{Y}} \quad \bar{Y}^2 = \frac{1}{N} \sum Y_i^2 - \bar{Y}^2 \\ V_y^2 &= \left(\frac{\sum Y_i}{N} \right)^2\end{aligned}$$

где N — число членов ряда, Y_i — ординаты эмпирических точек, \bar{Y} — величины, полученные из параболы $Y_i = Ax_i^2 + Bx_i + C$.

На рисунке 4 начерчена диаграмма процесса для расчета индекса нелинейной автокорреляции. В литературе [6, 7] находится подробное объяснение для сравнения индекса и коэффициента автокорреляции. На рисунке 1 начерчены коррелограммы IK_T средних месячных величин притока и осадков, определенных по системе Тиссена, как и коррелограммы R_T того же ряда месячных величин стока на водомерном профиле Крушица (река Лика). На рисунке 2 начерчены коррелограммы IK_T средних полумесячных величин осадков и стока в том же водомерном профиле. Продолжительность обработанного ряда была 20 лет.

Видно, что всегда $|K_T| > R_T$. Необходимо подчеркнуть, что в ряду величин стока очень ясно выделяются циклы с фазой в 12 месяцев, в то время как в ряде осадков циклов вообще не наблюдается.

На рисунке 3 начерчены коррелограммы средних полумесячных температур. Циклы очень явны, а величины $|K_T|$ очень высоки. Очевидно, будущие температуры можно определить на основании предыдущих.

Автокорреляционная функция показывает общую зависимость данных одного периода от данных, предыдущего периода, со сдвигом T . Измерение автокорреляции является отличным способом для количественного выявления определяемых элементов, очень часто замаскированных в своей случайной базе. Не редки также обратные случаи, т.е. когда определенная база запутана случайными помехами. Тогда нужно применить статистический аппарат для количественного определения существующих взаимосвязей.

Автокорреляционный анализ необходим как предварительное исследование для вероятностного подхода к прогнозу гидрологических явлений. Этот анализ может очень ясно и количественно показать возможности долгосрочных прогнозов гидрологических явлений.

Вероятностная модель прогноза

В дальнейшем тексте мы покажем модель прогноза стока для промежутков меньших года, а это сделаем процессом Маркова.

Год и годовой сток рассматривается как единицы времени и количества. Год делится на меньшие промежутки времени в зависимости от надобностей задачи. Суммарный сток одного года принимается за 100%, а количество стока в выделенном промежутке времени выражается в процентах общего годового стока. Анализируются доли участия стока за отдельные промежутки времени в стоке всего года. Анализируются также интегральные кривые, полученные по этим данным. На рисунке 5 схематически показана группа таких интегральных кривых.

Включением нового интервала X_l в ряд величин стока выключается интервал $X_{l-\lambda}$ ($\lambda = 12$, если интервал продолжается месяц, $\lambda = 24$, если интервал продолжается половину месяца,

$\lambda = 4$, если интервал длится только один сезон и т.д.). Таким образом рассматриваются интегральные кривые с различными начальными интервалами.

При таком подходе год рассматривается как отмирающая система. Отмирание, т.е. расходование, начинается в первом по порядку интервале года, а 100% расходуется в последнем промежутке. Для всякого интервала j -ого по порядку в году, с начальным интервалом года X ,

процент расходования всего годового стока колеблется в границах от $Q_{j \text{ MIN}}^x$ до $Q_{j \text{ MAX}}^x$ (см. рисунок 5).

Очень значительным показателем, иллюстрирующим возможность прогноза по указанному способу, является коэффициент использования β . Он определяется процентом поверхности, которую закрывают граничные суммарные кривые (максимальная и минимальная) реализованных годов.

Теоретически β вращается в границах от $\beta_{\text{MIN}} = 1$ до $\beta_{\text{MAX}} = 0$ (см. рисунок 6). Если бы β_{MIN} осуществлялся, это значило бы, что не существует возможности от 1 до $(n-1)$ интервала стока и что весь процесс стока развивается в течение последнего n -ого интервала. Это соответствует варианту АБС на рисунке 6. Для β_{MIN} была бы возможна и другая крайность, т.е. весь годовой сток истекает в первом интервале и вследствие этого остальные интервалы были бы засушливы. Это соответствует варианту АВС на рисунке 6. Случай реализации β_{MAX} означал бы, что все годы отмирают одинаковым способом. Это относится к определенному процессу. Ясно, что вероятность реализации β_{MAX}

$$P_{\beta_{\text{MAX}}} = 0,$$

так как этот процесс является случаем. Для вероятности реализации β_{MIN} можно утверждать, что и она стремится к 0.

Дальнейший этап работы состоит в расчете матриц переходных вероятностей для перехода из одного интервала j в следующий $(j+1)$ интервал. Если выбранный интервал является одним месяцем, то надо рассчитать $10 \cdot 12 = 120$ матриц переходных вероятностей. Первый множитель 10 означает число переходов, т.е. переход из I-ого по порядку месяца в году во 2-ой по порядку, из 2-го - в 3-й и т.д.

Второй множитель 12 означает 12 возможных начальных месяцев в году (12 "видов" года), т.е. год может начинаться любым из месяцев.

Матрица переходных вероятностей для перехода из j -ого в $(j+1)$ -ый интервал, с начальным интервалом X , получает форму

$$V^{j,j+1} = \begin{bmatrix} v^{j,j+1} & v^{j,j+1} & \dots & v^{j,j+1} \\ x^{v^{j,j+1}} & x^{v^{j,j+1}} & \dots & x^{v^{j,j+1}} \\ x^{v^{j,j+1}} & x^{v^{j,j+1}} & \dots & x^{v^{j,j+1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x^{v^{j,j+1}} & x^{v^{j,j+1}} & \dots & x^{v^{j,j+1}} \end{bmatrix} \quad \sum = 1$$

Особенное значение имеет выбор границ xV_x^j и выбор числа разрядов для того, чтобы можно было провести расчет переходных вероятностей. Нужно было бы найти функцию распределения, которая приспособлена к эмпирическим данным (см. рисунок 7). Автор считает, что это распределение

вероятностей должно быть нормальным.

Расчет определяемого стока производится следующим способом. Интервал прогнозирования является последним интервалом года. Следовательно, в процессе истечения года мы получаем большую информацию. В частности, известны величины стока предыдущих интервалов. Процентам стока последнего интервала берется возможность, что она составит величину в пределах от минимальной до максимальной наблюдаемой границы. Выбирается ряд нескольких возможных величин стока последнего интервала. Для каждой выбранной величины рассчитывается ее вероятность по формуле

$$xP_i = x^{\alpha_i} \times v^{1,2} \times v^{2,3} \dots$$

где x^{α_i} - вероятность реализации первого интервала, $v^{1,2}, v^{2,3}, \dots$ - соответствующая вероятность из матрицы переходных вероятностей xV .

Вероятности реализаций кривой отмирания сравниваются между собой таким образом, что ставятся в соотношение

$$xP_1 : xP_2 : \dots : xP_i :$$

Самые вероятные реализации собираются около одной. Из самой вероятной или из их совокупности выбираем определяемый сток (рисунок 8).

Очевидно, что такая большая задача представляла бы затруднение при обычном расчете, а потому применяются электронные вычислительные машины. В приведенном ниже небольшом численном примере с произвольно выбранными величинами показаны этапы расчета предлагаемой модели.

с.в. год-	I	II	III	IV	Σ
1.	21	8	9	4	42
2.	14	10	8	4	36
3.	19	13	7	6	45
4.	15	12	8	11	46
5.	27	13	3	2	45
6.	17	11	8	?	

I.	21	29	38	42	: 42
2.	14	24	32	36	: 36
3.	19	32	39	45	: 45
4.	15	27	35	46	: 46
5.	27	40	43	45	: 45

I.	0,500	0,690	0,905	I,0
2.	0,389	0,667	0,889	I,0
3.	0,422	0,711	0,867	I,0
4.	0,326	0,587	0,761	I,0
5.	0,600	0,761	0,955	I,0

$$\beta = \frac{1}{3} \left[0,137 + \frac{0,274 + 0,202}{2} \frac{0,202+0,194}{2} + 0,097 \right] = 0,223$$

Границы:

$$I V_1^I = 0 ; \quad I V_2^I = 0,45 ; \quad I V_3^I = 1,0 ;$$

$$I V_1^2 = 0 ; \quad I V_2^2 = 0,71 ; \quad I V_3^2 = 1,0 ;$$

$$I V_1^3 = 0 ; \quad I V_2^3 = 0,86 ; \quad I V_3^3 = 1,0$$

$I V_{ab}^{1,2}$	0-0,71	0,71	$I V_{ab}^{2,3}$	0-0,86	0,86
0-0,45	0,666	0,333	0-0,71	0,333	0,666
0,45	0,500	0,500	0,71	0,000	1,000

Выбранные реализации интервалов:

$$Q_1 = 3,9; \quad Q_2 = 8,4$$

	X_1	X_2
I	I7	I7
II	II	II
III	8	8
IV	3,9	8,4
Σ	39,9	44,4

	ΣX_1	ΣX_2
I	I7	I7
II	28	28
III	36	36
IV	39,9	44,4

$$I P_1 : I P_2 = (I d_1 0,666 \quad 0,666) \cdot \\ \cdot (I d_2 0,666 \quad 0,333)$$

$I d_1 = I d_2$ (потому, что находятся в том же
разряде)

$$I P_1 : I P_2 = 2 : 1$$

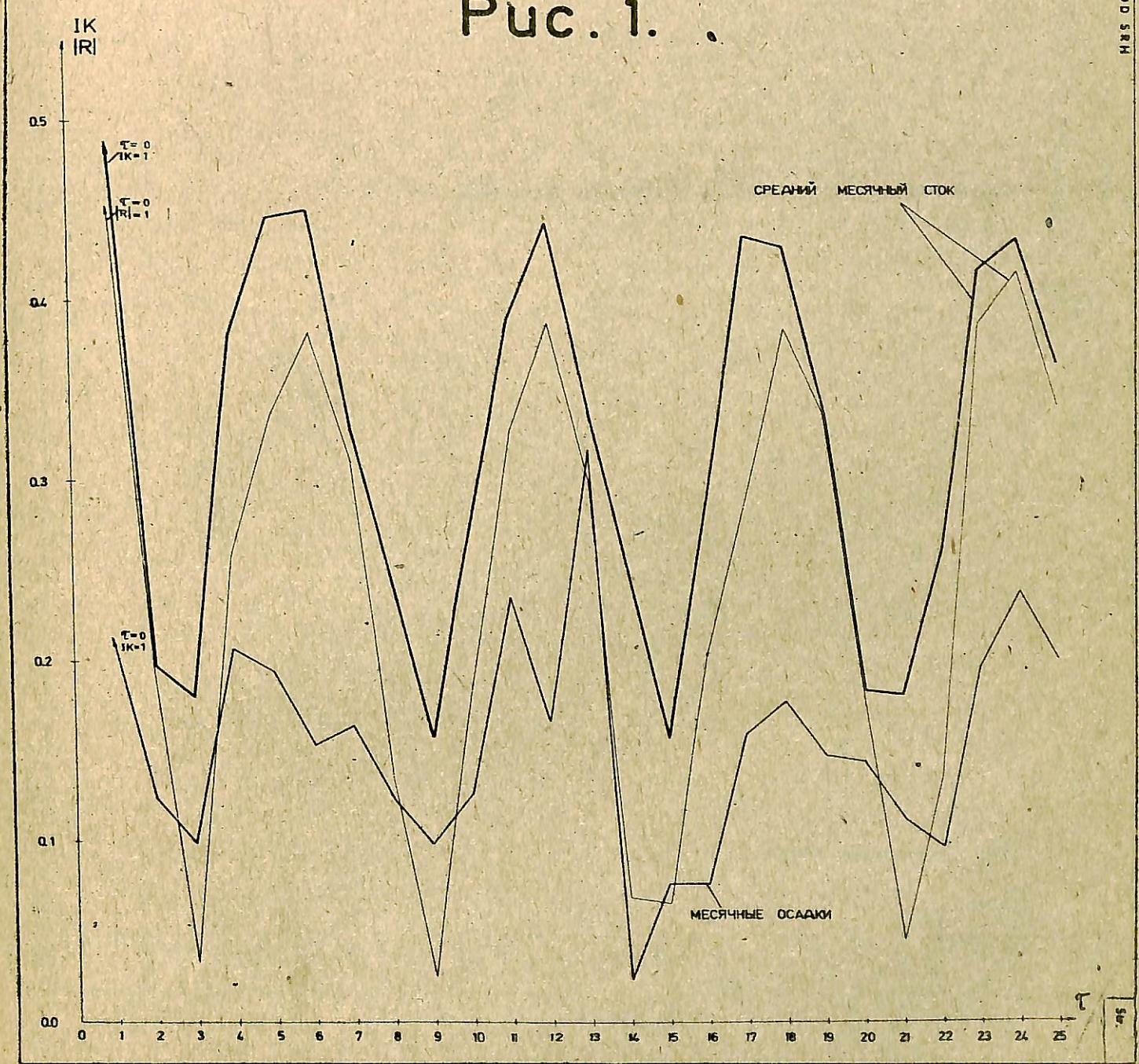
Самая вероятная величина:

$$Q_2 = 3,9$$

Л и т е р а т у р а

1. Группа авторов. Воднозергетические расчеты методом Монте-Карло. Энергия. Москва, 1969.
2. Сборник докладов. Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета. Московский университет, 1967.
3. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1968.
4. Кацвелашвили Н.А. Регулирование речного стока. Гидрометеоиздат, Ленинград, 1970.
5. Рождественский В. К вопросу статистической оценки дисперсий эмпирических автокорреляционных функций, Труды ЦИЦ, вып. I74, 1969.
6. BONACCI O. Primjena linearne i nelinearne autokorelacione funkcije za prognozu hidroloških fenomena. VIII Kongres JNKVB, Ohrid, 1970.

Рис. 1.



РУС. 2.

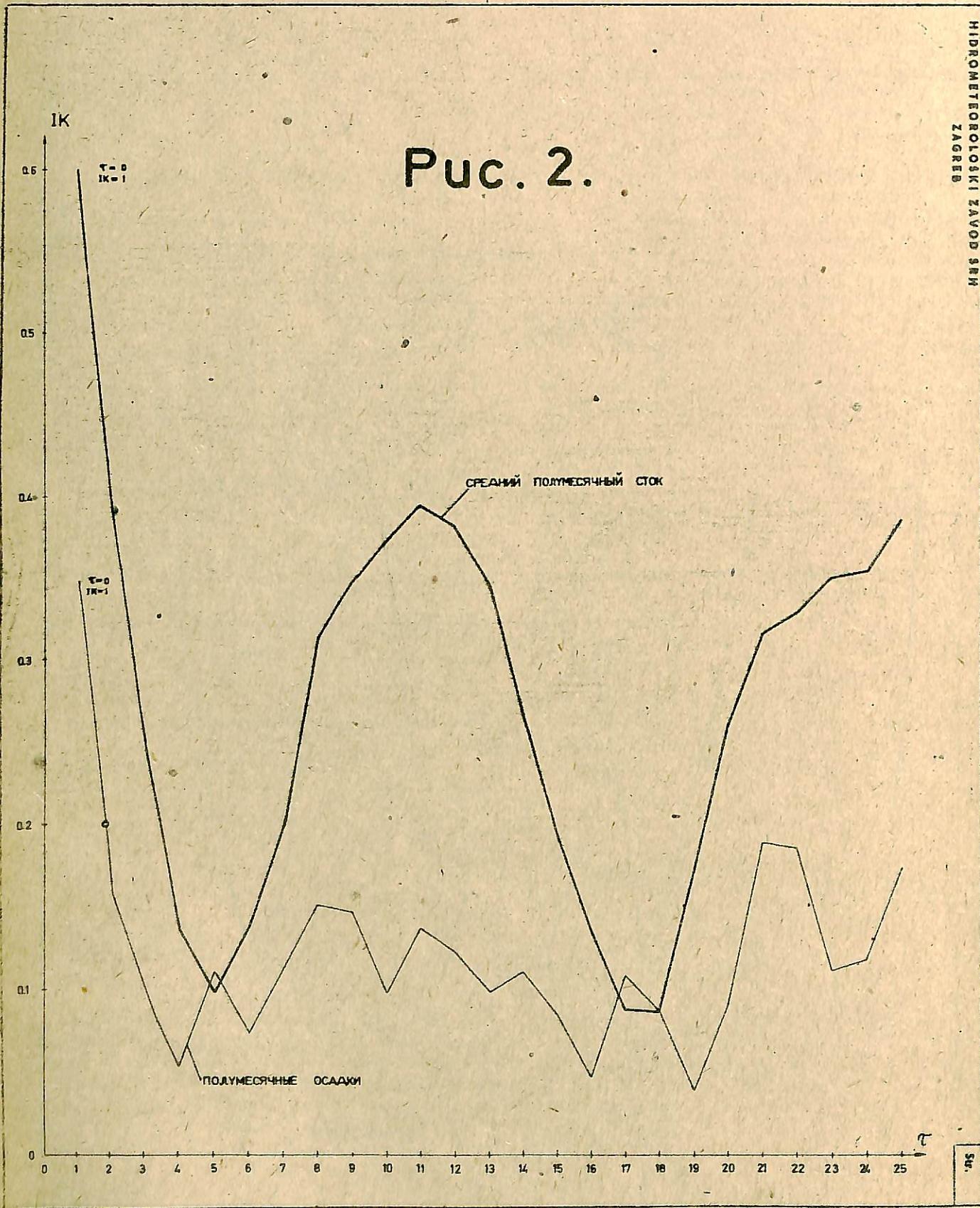
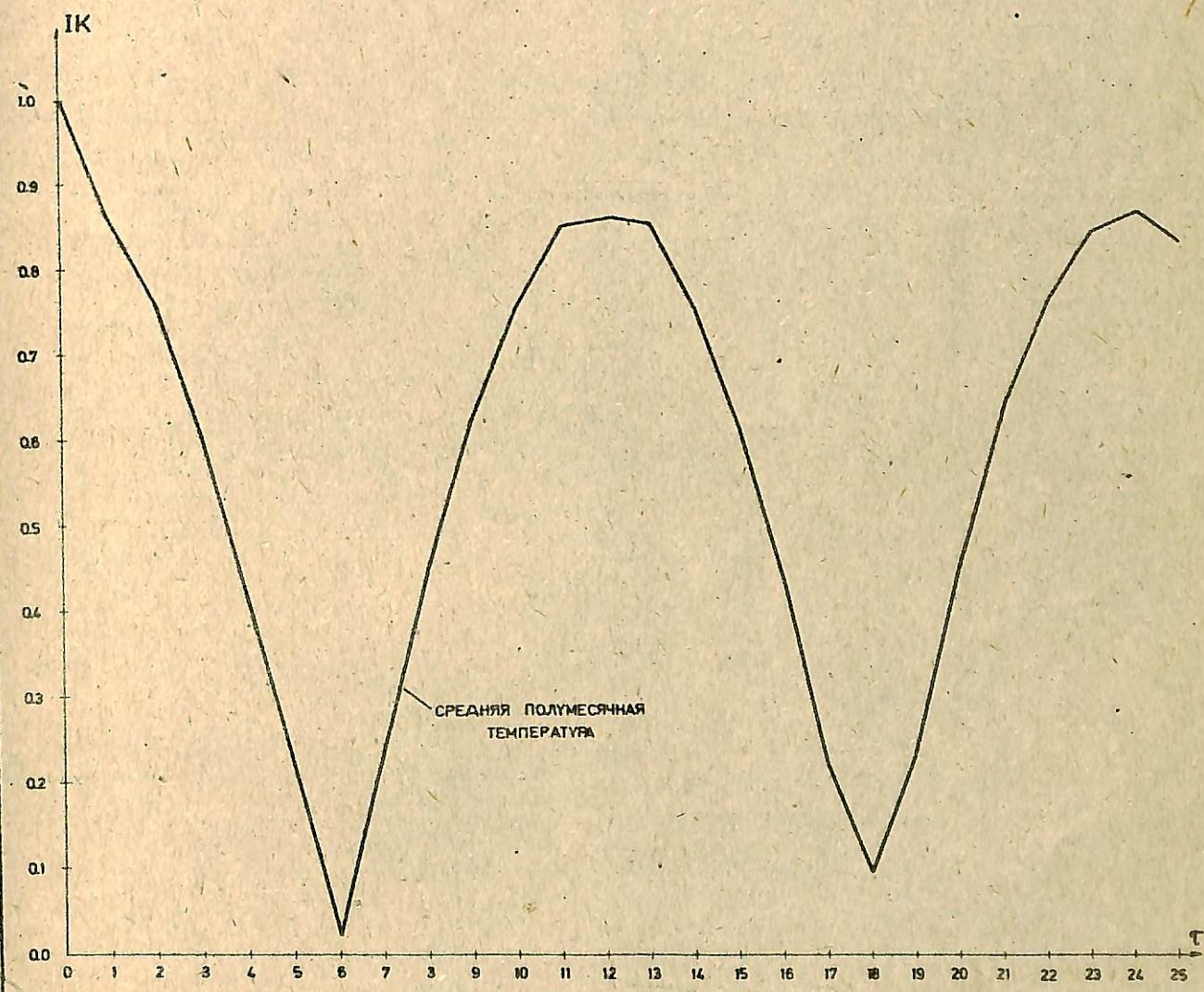
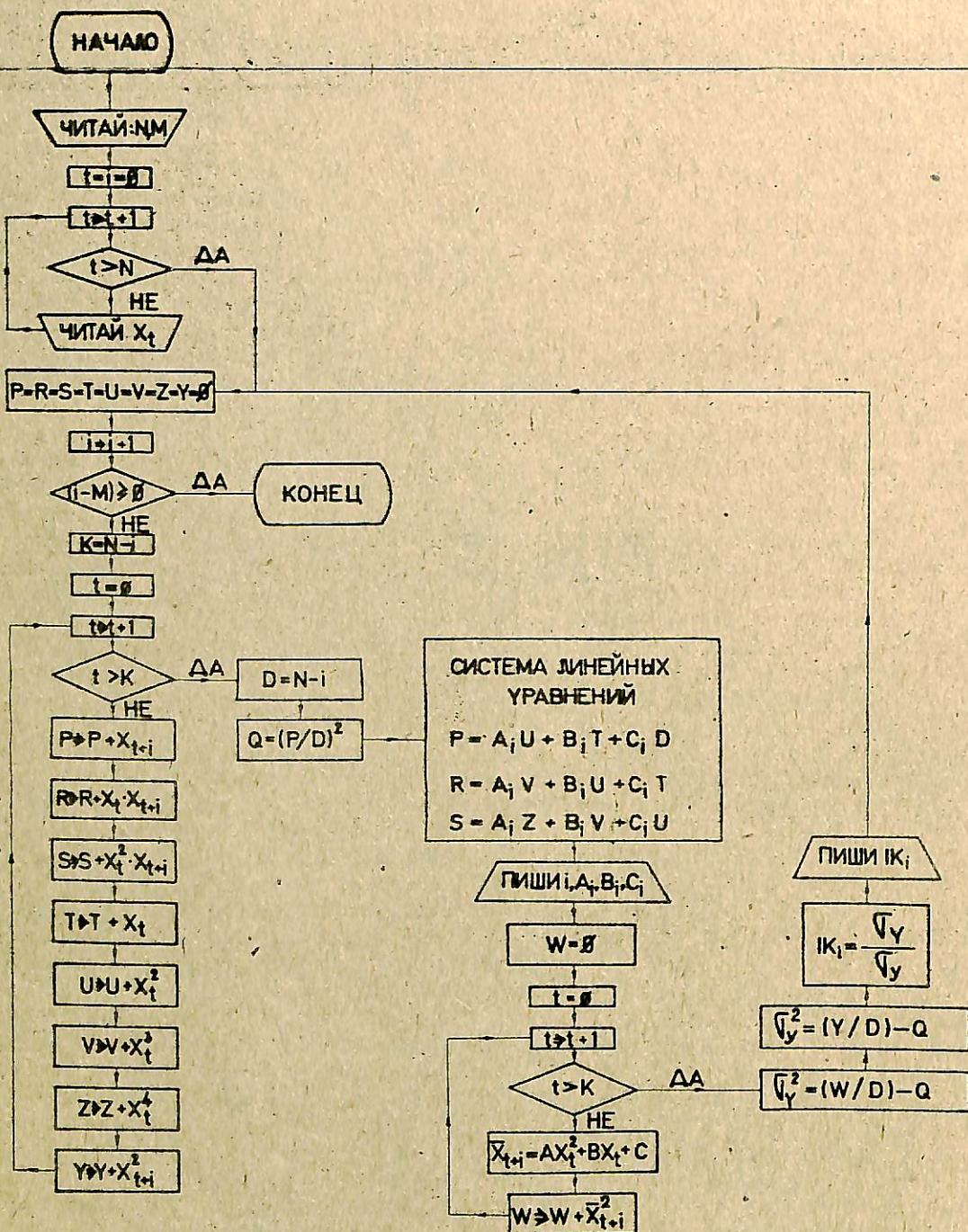


Рис. 3.





ОБЪЯСНЕНИЕ:

N — ЧИСЛО ЧЛЕНОВ РЯДА

$$P = \sum X_{t+i}$$

M — НУЖНОЕ ЧИСЛО РАСЧЕТОВ

$$R = \sum X_{t+i} X_t$$

IK — ИНДЕКС АВТОКОРРЕЛЯЦИИ

$$S = \sum X_{t+i} X_t^2$$

$$Y = \sum X_{t+1}^2$$

$$T = \sum X_t^2$$

$$Z = \sum X_t^4$$

$$U = \sum X_t^3$$

$$V = \sum X_t^5$$

Рис. 4.

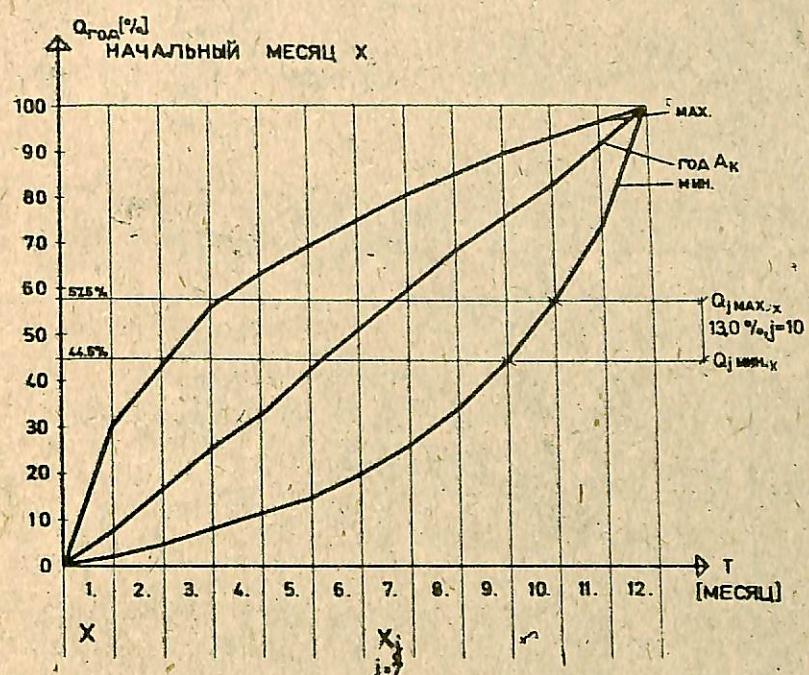
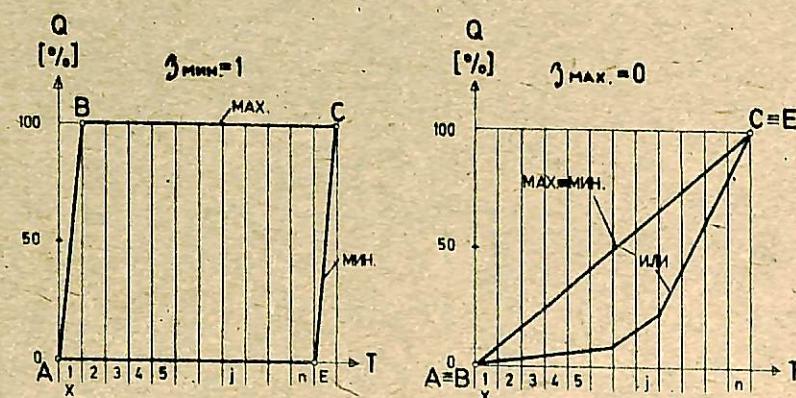


Рис. 5.



Puc. 6.

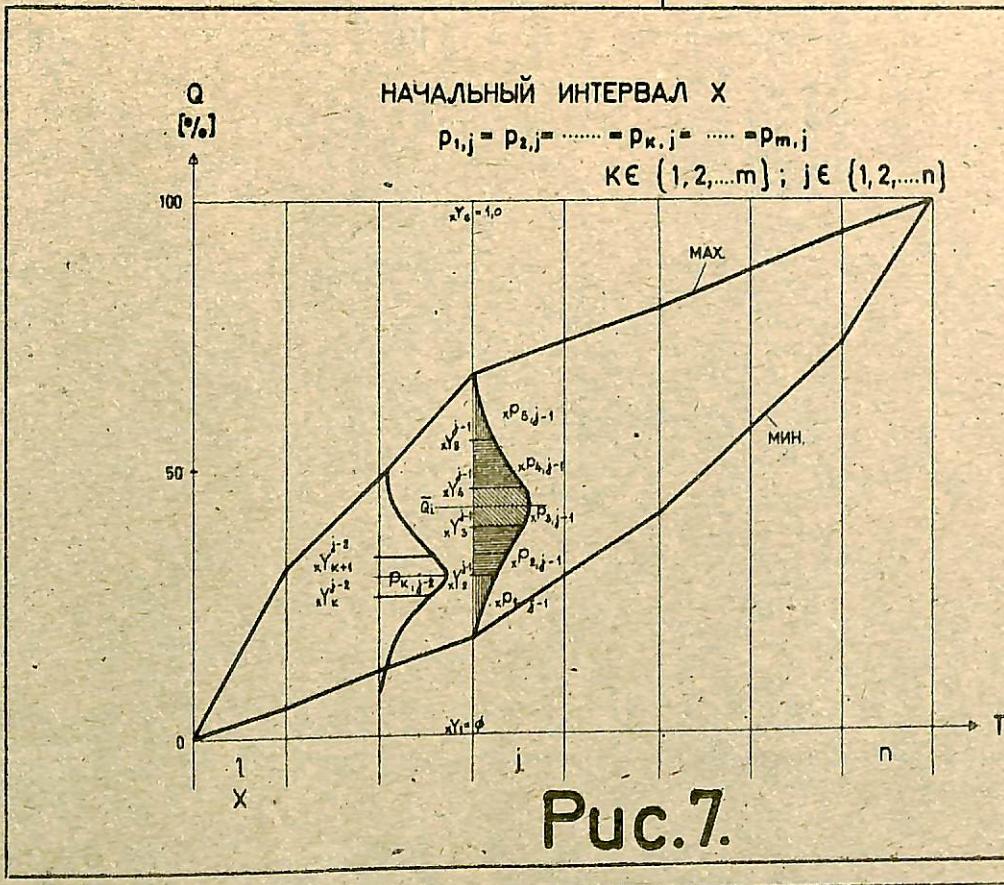
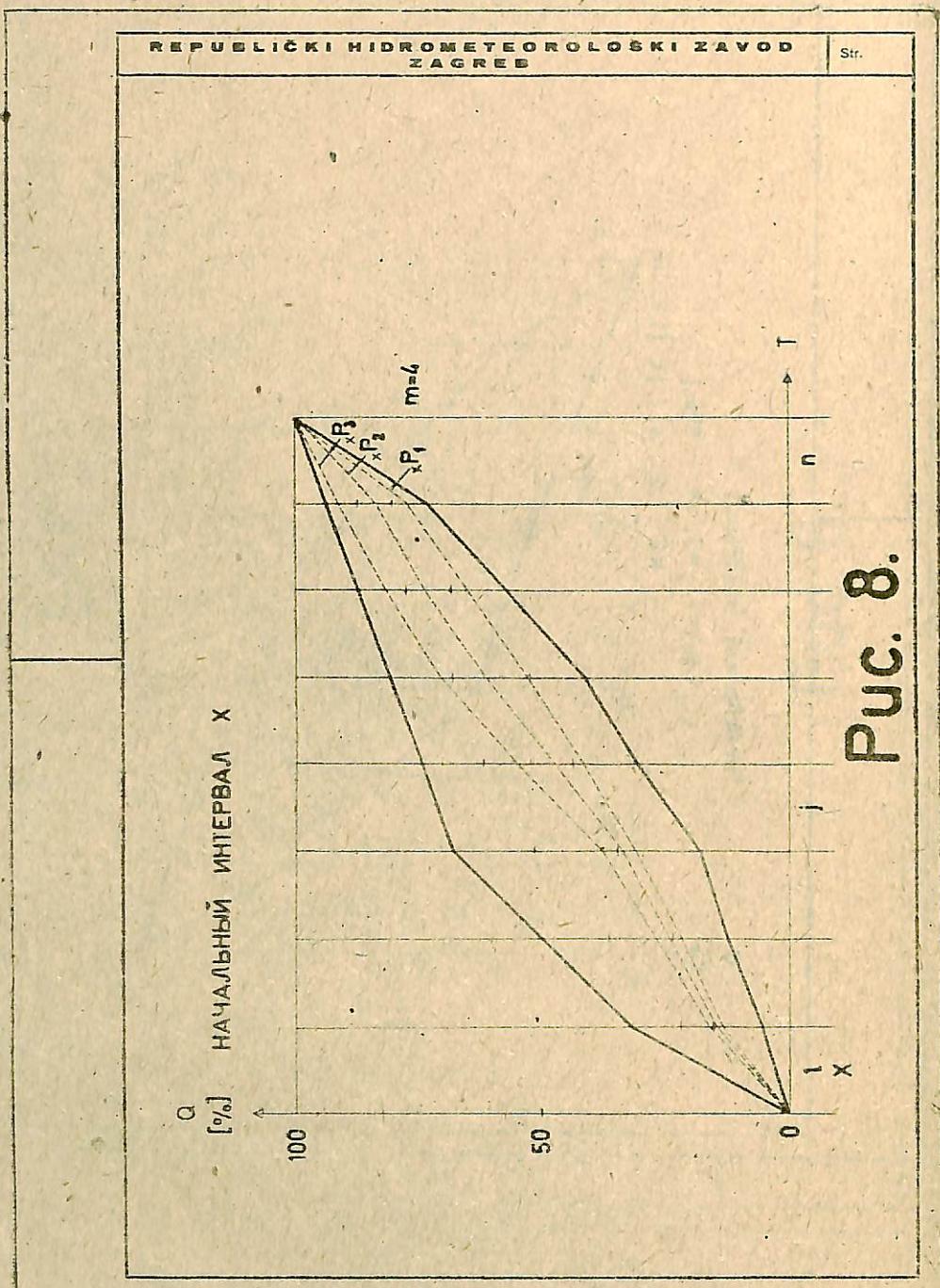


Рис.7.



ОБОСНОВАНИЕ СВЕРХДОЛГОСРОЧНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЗНАЧЕНИЯ

ПРОХАСКА Й.СТЕВАН

Гидрометеорологический институт,
Белград, СФРЮ

Р е з и м е

K u r z f a s s u n g

Доклад содержит описание математической модели, которая наряду с численными решениями дает и вероятность, с которой утверждается, что величина прогнозируемого явления осуществляется в определенном интервале, а численное решение модели является только более вероятным значением прогнозируемой величины.

In diesem Referat wird ein mathematisches Modell dargestellt, der gibt numerische Ergebnisse und ebenso die Wahrscheinlichkeit dass prognosierende Grösse in einem bestimmten Intervall steht und numerisches Ergebnis des Models nur ein wahrscheinlichster Wert der prognosierenden Grösse ist.

S u m m a r y

The paper deals with magnitude forecast model that, apart from numerical solutions, gives a liability affirming that the magnitude forecast will be in a definite interval, and the numerical solution of model is only the most likely value of magnitude forecast.

Обоснование сверхдолгосрочных гидрологических прогнозов

В настоящее время, как известно, существуют генетические методы сверхдолгосрочных гидрологических прогнозов, основанные на учете внешних причинно-следственных связей. Авторы этих методов усматривают причины изменчивости гидрологических явлений в особенностях развития атмосферных процессов, принимая метеорологические параметры в качестве основы прогностических методов.

Все известные до сих пор попытки сверхдолгосрочного прогноза годового стока сводятся к установлению эмпирических зависимостей стока от характеристик циркуляции атмосферы в некоторых районах земного шара за некоторые предшествующие отрезки времени. При этом выбор районов и предшествующих периодов осуществляется эмпирическим подбором, что в принципе не может привести ни к достаточной физической обоснованности, ни к надежности полученных зависимостей. Как отмечают Б.А.Аполлов, Г.П. Калинин и В.Д.Комаров [4], проблема использования характеристик атмосферной циркуляции в целях разработки методов долгосрочных прогнозов стока еще далеко не разрешена. Опыт показывает, что многие из эмпирически выявленных зависимостей оказались справедливыми только для того ряда наблюдений, на основе которого они были выведены; в дальнейшем эти зависимости нарушились. Это является прямым следствием недостаточной изученности закономерностей колебания атмосферной циркуляции.

По мнению Ю.М.Алехина [3], дело заключается в необоснованности самого генетического метода; его предпосылка об однозначной причинности не соответствует повсеместной вероятностной причинности в природе.

В связи с этим, в настоящее время предприняты новые попытки обоснования сверхдолгосрочного прогноза, которые в основе отличаются от так называемого генетического метода. Так как генетический

метод основан на учете внешних причинно-следственных связей, автор нового обоснования Ю.М.Алехин считает, что причину изменения надо искать в том же самом явлении, т.е. на учете внутренних причинно-следственных связей. Точка зрения Алехина основана на основном принципе современной долгосрочной синоптики о цикличности атмосферных процессов во времени.

Подтвержденная многими исследованиями закономерная хронологическая последовательность атмосферных процессов представляет собой основу современной долгосрочной синоптики. Все эти методы являются экстраполяционными, вследствие чего развитие процессов в будущем предполагается предопределенным состоянием их в прошлом. Иными словами, принципиальная сущность прогнозирования может быть представлена в виде:

$$J_{(t+m-1)} = f[J_{(t-1)}, J_{(t-2)}, \dots, J_{(t-n)}], \quad (I)$$

где $J_{(t-1)}, \dots, J_{(t-n)}$ - характеристики атмосферных процессов за предшествующие периоды времени (в нашем случае годы).

$J_{(t+m-1)}$ - экстраполированное (предвычисление) значение характеристик атмосферного процесса с заблаговременностью m лет.

Следует подчеркнуть, что сток в замыкающем створе бассейна интегрирует всеобъемлющий комплекс причинно-следственных связей, касающихся общего метеорологического состояния атмосферы, почвенной поверхности, грунта, и т.д. Отражающий все эти связи во времени исходный ряд представляет собой основу современного обоснования сверхдолгосрочных прогнозов. Многие исследователи подтверждают, что как в атмосферном процессе, так и в исходном гидрологическом ряде существует закономерная хронологическая последовательность, т.е. цикличность. Это дает право современному исследователю искать причину изменения гидрологического явления в том же самом явлении, т.е. искать внутренние причины.

Что касается проблемы причинности, то надо отметить, что в последние годы в советской философии начался коренной пересмотр понятия о причинности. Так, в работе [9] указано, что в развитых научных дисциплинах, достигших высокой степени использования математического аппарата и дающих открываемым закономерностям математическую формулировку под причинностью понимается прежде всего связь состояний во времени такая, что на основе знания предшествующего состояния системы можно предсказать ее будущее состояние. Повторяю, что в развитых научных теориях, когда говорят о причинности, имеют в виду не столько единичные случаи воздействия одной вещи на другую, сколько закономерное, необходимое протекание процессов. Причинно-обусловленные процессы тем и характеризуются, что в них задание начального состояния определяет последующие состояния, и именно в наличии такой последовательности и заключается наиболее важное для науки выражение принципа причинности.

Таким образом, с полным основанием получаем, что реализацию гидрологического процесса можно написать в виде:

$$q_{(t+m-1)} = f[q_{(t-1)}, q_{(t-2)}, \dots, q_{(t-n)}]. \quad (2)$$

Распределение прогнозируемого значения

Существующие методы прогнозирования гидрологических элементов (уровней, расходов воды) дают математическое решение, результат которого в большей или меньшей мере отклоняется от фактических значений. Очевидно, что до сих пор ни одна математическая модель не дает решения, которое полностью согласовывается с действительными значениями. Возникает вопрос, с какой априорной вероятностью может подтвердиться то, что решение, полученное математическим путем, будет соответствовать фактическому значению?

Задачей этой работы является определение такой математической модели, которая вместе с численным решением будет давать и вероятность того, что прогнозируемое значение попадет в один определенный интервал, где данное решение модели является его наиболее вероятным значением.

Основной принцип модели состоит в исследовании математической зависимости прогнозируемого значения (зависимой переменной) от отдельных параметров (независимых переменных), которые непосредственно влияют на его изменение. Так как связи между отдельными гидрологическими параметрами обычно недостаточно тесные, то очевидно, существует возможность применения только статистических, а именно корреляционных связей. Поэтому для исследований корреляционной зависимости использован известный

метод наименьших квадратов - множественной корреляции, а зависимость отражена в следующем линейном виде:

$$\bar{H}_{np} = \sum_{j=1}^m \bar{x}_j H_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

где \bar{H}_{np} - наиболее вероятное прогнозируемое значение;

H_j - независимый переменный параметр, который влияет на изменение прогнозируемого значения; в гидрологических прогнозах выбираются такие параметры, которые в момент выпуска прогноза уже известны;

\bar{x}_j - неизвестные константы, наиболее вероятные значения которых определяются методом наименьших квадратов.

Кроме наиболее вероятных значений неизвестных констант тем же самым методом определяются и их средние квадратичные отклонения по формуле:

$$\sigma_{\bar{x}_j} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P_{\bar{x}_j}}}$$

где $\sigma_{\bar{x}_j}$ - среднее квадратичное отклонение \bar{x}_j ;

σ_0 - среднее квадратичное отклонение на единице веса, определяемое по формуле:

$$\sigma_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n-1},$$

где ε_i - фактическое отклонение, которое получается после замены полученных неизвестных x_j , в начальных уравнениях;

n - номер начальных уравнений;

$P_{\bar{x}_j}$ - вес неизвестной \bar{x}_j ; находится путем решения уравнений через детерминанты по выражению:

$$P_{\bar{x}_j} = \frac{D}{D_{\bar{x}_j}},$$

где D - детерминант системы нормальных уравнений;

$D_{\bar{x}_j}$ - минор детерминанта системы нормальных уравнений элементов с главной диагональю.

Уравнение (3) представляет линейную математическую связь между известными значениями (гидрологических величин) и прогнозируемого параметра. Но так как для констант в уравнении определены их наиболее вероятные значения и прогнозируемое значение получено по тому же самому уравнению, то и прогноз имеет также только наиболее вероятное значение. Действительное значение прогнозируемой величины должно находиться в доверительном интервале, заданном с определенной вероятностью, если известны параметры функции распределения.

Известной функцией распределения прогнозируемого значения этот интервал полностью определен.

$$P[\bar{H}_{np} - t\sigma \leq H_{np} \leq \bar{H}_{np} + t\sigma] = 2\Phi(t) - 1, \quad (4)$$

где H_{np} - действительное значение прогнозируемой величины;
 σ - среднее квадратичное отклонение, равное:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (H_{np_j} - \bar{H}_{np})^2}{n-1},$$

$$t = \frac{H_{np_j} - \bar{H}_{np}}{\sigma},$$

$\Phi(t)$ - функция распределения прогнозируемой величины.

Известно, что гидрологические величины отражают некоторые из известных функций распределения. Возникает вопрос, какой закон распределения отражает прогнозируемая величина, которая, в сущности, представляет собой выведенное значение, полученное на основе известных (достоверных) событий. По теореме А.М.Ляпунова каждая выведенная величина $\zeta = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_s + \dots$ отражает нормальный закон распределения, независимо от того, какой закон распределения отражает переменная из генеральной совокупности η_s . Согласно изложенной теореме, прогнозируемая величина H_{np} отражает также нормальный закон распределения.

Из уравнения (3) следует, что прогнозируемая величина есть функция достоверных событий и неизвестных констант, чьи основные показатели определены методом наименьших квадратов. Так как плотность функциональной связи зависит от плотности неизвестных констант, то функцию распределения прогнозируемой величины будут диктовать доверительные интервалы неизвестных констант. Если прогнозируемая величина подчиняется нормальному закону распределения, можно с достаточной достоверностью принять, что неизвестные константы тоже следуют нормальному закону распределения.

Необходимо установить интервалы доверительности неизвестных констант, заданные с определенными вероятностями. В нашем конкретном случае рассматриваются следующие интервалы, чаще всего употребляемые в гидрологии:

$$\begin{aligned} P[|\bar{x}_j \pm 0,674\sigma_{\bar{x}_j}| \leq x_j] &= 50,0 \% \\ P[|\bar{x}_j \pm \sigma_{\bar{x}_j}| \leq x_j] &= 68,3 \% \\ P[|\bar{x}_j \pm 2\sigma_{\bar{x}_j}| \leq x_j] &= 95,5 \% \\ P[|\bar{x}_j \pm 3\sigma_{\bar{x}_j}| \leq x_j] &= 99,7 \% \quad (5) \\ j &= 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Если за константы в уравнении (3) взять границы их интервалов и с учетом их вычислить прогнозируе-

мые величины, то получаются интервалы доверительности прогнозируемой величины ΔH с определенной вероятностью:

$$\Delta H = |\bar{H}_{np} + t\sigma| - |\bar{H}_{np} - t\sigma|.$$

Используя вычисленные значения наиболее вероятных прогнозируемых величин и определенных интервалов доверительности ΔH , находим корреляционную зависимость:

$$\bar{H}_{np} = f(\Delta H).$$

Вычисленная зависимость определяет связь между наиболее вероятными значениями прогнозируемых величин и определенных интервалов доверительности. Это дает возможность приближения к интервалам доверительности прогнозируемых величин, если ранее по уравнению (3) вычислено наиболее вероятное значение прогнозируемой величины.

Применение модели

Представленная математическая модель применена для р.Дуная на участке Будапешт-Бездан для прогнозирования уровня у Бездана. В конкретном примере взяты в расчет все паводки, амплитуды уровней которых у Будапешта были больше 150 см, а расчет проведен по фазе подъема.

Для того, чтобы реальнее представить динамику движения паводка, при выборе параметров определена скорость перемещения паводка (определенено среднее время добегания на участке Будапешт-Бездан, равное двум суткам) и взяты "связанные" параметры, которые характеризуют уровни воды у Будапешта, как в верхнем створе и у Бездана, как в нижнем створе в день выпуска прогноза.

Уравнение для прогнозирования наиболее вероятного уровня у Бездана, полученное методом наименьших квадратов (множественной корреляции), имеет следующий вид:

$$H_{Без+2} = 0,763090 H_{Буд} - 0,374941 H_{Буд-2} + 0,573236 H_{Бес}. \quad (6)$$

где $H_{Без+2}$ - наиболее вероятный уровень у Бездана с заблаговременностью двое суток;
 $H_{Бес}$ - уровень у Бездана в день выпуска прогноза;
 $H_{Буд}$ - уровень у Будапешта в день выпуска прогноза;
 $H_{Буд-2}$ - уровень у Будапешта двое суток тому назад от дня выпуска прогноза.

Среднее квадратичное отклонение наиболее вероятных констант равно:

$$\sigma_{\bar{x}_1} = 0,020184$$

$$\sigma_{\bar{x}_2} = 0,043233$$

$$\sigma_{\bar{x}_3} = 0,038025$$

Доверительные интервалы неизвестных констант, которые вычислены по уравнению (5) с определенными вероятностями следующие:

$$P[-0,776670 \leq X_1 \leq -0,749510] = 50,0\%$$

$$P[-0,783274 \leq X_1 \leq -0,742906] = 68,3\%$$

$$P[-0,803358 \leq X_1 \leq -0,722722] = 95,5\%$$

$$P[-0,823542 \leq X_1 \leq -0,702638] = 99,7\%$$

$$P[0,345792 \leq X_2 \leq 0,404091] = 50,0\%$$

$$P[0,331708 \leq X_2 \leq 0,418174] = 68,3\%$$

$$P[0,288575 \leq X_2 \leq 0,461407] = 95,5\% \quad (7)$$

$$P[0,245242 \leq X_2 \leq 0,504640] = 99,7\%$$

$$P[-0,598856 \leq X_3 \leq -0,547616] = 50,0\%$$

$$P[-0,611126 \leq X_3 \leq -0,535211] = 68,3\%$$

$$P[-0,649286 \leq X_3 \leq -0,497186] = 95,5\%$$

$$P[-0,687311 \leq X_3 \leq -0,454161] = 99,7\%$$

В табл. I приведены доверительные интервалы прогнозируемого уровня у Бездана. Границы доверительных интервалов прогнозируемого уровня получены после замены границ доверительных интервалов неизвестных констант в уравнении (3). Графический вид корреляционной зависимости доверительного интервала прогнозируемой величины ΔH наиболее вероятного прогнозируемого уровня у Бездана и соответствующей вероятности показан на рис. 2. Зависимости параболические и полученные методом наименьших квадратов гласят:

Вероятность 50,0% :

$$H_{\text{Без+2}} = -0,0055 (\Delta H)^2 + 7,2146 (\Delta H) + 49,1788 ;$$

Вероятность 68,3% :

$$H_{\text{Без+2}} = -0,0030 (\Delta H)^2 + 5,1373 (\Delta H) + 37,7458 ;$$

Вероятность 95,5% :

$$H_{\text{Без+2}} = -0,0007 (\Delta H)^2 + 2,5199 (\Delta H) + 40,7147 ;$$

Вероятность 99,7% :

$$H_{\text{Без+2}} = 0,0003 (\Delta H)^2 + 1,6725 (\Delta H) + 41,8792 ,$$

где H — промежуток доверительности — разница между верхней и нижней границей доверительного интервала прогнозируемого уровня у Бездана.

Для лучшего понимания изложенного ниже приводится конкретный пример расчета для следующего случая:

$$H_{\text{Буд}} = 500 \text{ см}$$

$$H_{\text{Буд-2}} = 400 \text{ см}$$

$$H_{\text{Бес}} = 400 \text{ см}$$

Наиболее вероятное значение промежуточного уровня у Бездана с заблаговременностью двое суток $H_{\text{Без+2}}$ получено по уравнению (6) и составляет 461 см.

Действительное значение прогнозируемого уровня вычислено через доверительные интервалы неизвестных констант (уравнение 7) и находится в следующих интервалах:

$$P[432 \leq H_{\text{Без+2}} \leq 489] = 50,0\%$$

$$P[418 \leq H_{\text{Без+2}} \leq 503] = 68,3\%$$

$$P[376 \leq H_{\text{Без+2}} \leq 546] = 95,5\%$$

$$P[331 \leq H_{\text{Без+2}} \leq 589] = 99,7\%$$

На рис. 3 показан графический вид уравнения (6), а пунктирной линией отмечен путь прогнозирования. Заштрихованные площади представляют собой доверительные интервалы прогнозируемой величины, то есть функцию распределения прогнозируемого уровня за конкретный представленный случай.

Поэтому представленная модель кроме наиболее вероятного численного решения прогнозируемой величины дает и ее функцию распределения.

Л и т е р а т у р а

1. Алексин Ю.М. Статистические прогнозы в геофизике. Изд. ЛГУ, 1963.
2. Алексин Ю.М. Динамико-статистический метод прогноза геофизических макропроцессов (на примере прогнозов годового стока). Труды ЛГМИ, вып. II, 1961.
3. Алексин Ю.М. Проблема причинности в гидрометеорологических прогнозах большой заблаговременности. Труды ЛГМИ, вып. 35, 1969.

4. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Гидрологические прогнозы. Гидрометеоиздат, 1960.
5. Бата Г. Применение статистического анализа в гидрологии. Строительный факультет, Белград.
6. Иванович Б. Теоретическая статистика.
7. Иванович С. Гидрология II. Применение теории вероятности и статистики. Строительный факультет, Белград.
8. Стипанич Е. Теория вероятности и математическая статистика, аспирантские лекции, Строительный факультет, Белград.
9. Философия естествознания. Сб. I. Изд-во политический литературы, 1966.

Таблица I

ТАБЛИЧНЫЙ ВИД ИНТЕРВАЛОВ ДОВЕРИТЕЛЬНОСТИ И СООТВЕТСТВУЮЩИХ
ВЕРОЯТНОСТЕЙ

ФАЗА ПОДЪЕМА АМПЛИТУДЫ > 150 см

№ рн	$P(\bar{H}_{\text{Без}+2} + t\sigma \leq H_{\text{Без}+2} \leq \bar{H}_{\text{Без}+2} + t\sigma)$	СООТВ. ВЕРОЯТ.	ИНТЕРВ. ΔH	ПРОГН. ВЕЛЧ. $H_{\text{Без}+2}$
I	$P(424 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 489)$	50	65	459
2	$P(452 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 522)$	50	70	488
3	$P(502 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 569)$	50	67	536
4	$P(530 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 601)$	50	71	565
5	$P(554 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 633)$	50	79	594
6	$P(575 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 658)$	50	83	618
7	$P(582 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 672)$	50	90	628
8	$P(573 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 653)$	50	80	614
9	$P(590 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 677)$	50	87	634
10	$P(225 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 264)$	50	39	244
II	$P(255 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 294)$	50	39	275
I2	$P(424 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 483)$	50	59	453
I3	$P(336 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 377)$	50	41	357
I4	$P(396 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 444)$	50	48	421
I5	$P(79 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 92)$	50	13	86
I6	$P(174 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 192)$	50	19	183
I7	$P(295 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 318)$	50	23	306
I8	$P(318 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 354)$	50	36	335
I9	$P(432 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 499)$	50	67	464
20	$P(452 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 520)$	50	68	487
2I	$P(498 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 566)$	50	68	555
22	$P(537 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 610)$	50	73	573
I	$P(406 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 511)$	68,3	I05	459
2	$P(439 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 539)$	68,3	I00	488
3	$P(485 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 585)$	68,3	I00	536
4	$P(510 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 617)$	68,3	I07	565
5	$P(535 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 649)$	68,3	II4	594
6	$P(566 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 680)$	68,3	I24	618
7	$P(561 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 693)$	68,3	I32	628
8	$P(554 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 672)$	68,3	II8	614
9	$P(571 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 699)$	68,3	I28	634
10	$P(215 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 273)$	68,3	58	244
II	$P(247 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 302)$	68,3	55	275
I2	$P(409 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 497)$	68,3	88	453
I3	$P(326 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 387)$	68,3	61	357
I4	$P(386 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 455)$	68,3	42I	421
I5	$P(75 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 96)$	68,3	2I	86
I6	$P(170 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 196)$	68,3	26	183
I7	$P(289 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 324)$	68,3	35	306
I8	$P(308 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 364)$	68,3	58	335
I9	$P(417 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 515)$	68,3	98	464
20	$P(438 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 536)$	68,3	98	487
2I	$P(480 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 582)$	68,3	I02	555
22	$P(520 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 627)$	68,3	I07	573

№ пп	$P(\bar{H}_{\text{Без}} + 2 + t\sigma \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq H_{\text{Без}} + 2 + t\sigma)$	СООТВ. ВЕРОЯТ.	ИНТЕРВ. ΔH	ПРОГН. ВЕЛИЧ. $H_{\text{Без}} + 2$
I	$P(356 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 560)$	95,5	204	459
2	$P(389 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 587)$	95,5	198	488
3	$P(437 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 633)$	95,5	196	536
4	$P(459 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 669)$	95,5	210	565
5	$P(479 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 707)$	95,5	228	594
6	$P(495 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 740)$	95,5	245	618
7	$P(498 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 757)$	95,5	259	628
8	$P(495 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 730)$	95,5	235	614
9	$P(507 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 760)$	95,5	253	634
10	$P(187 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 303)$	95,5	II6	244
II	$P(218 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 331)$	95,5	II3	275
12	$P(367 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 540)$	95,5	I73	453
13	$P(296 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 416)$	95,5	I20	357
14	$P(351 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 490)$	95,5	I39	421
15	$P(65 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 106)$	95,5	41	86
16	$P(156 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 210)$	95,5	54	183
17	$P(272 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 341)$	95,5	69	306
18	$P(280 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 391)$	95,5	III	335
19	$P(368 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 563)$	95,5	I97	464
20	$P(389 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 585)$	95,5	I96	487
21	$P(431 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 633)$	95,5	202	555
22	$P(465 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 681)$	95,5	216	573
I	$P(307 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 612)$	97,7	305	459
2	$P(539 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 637)$	97,7	298	488
3	$P(388 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 683)$	97,7	295	536
4	$P(406 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 721)$	97,7	315	565
5	$P(421 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 764)$	97,7	343	594
6	$P(435 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 801)$	97,7	366	618
7	$P(435 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 821)$	97,7	386	628
8	$P(437 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 788)$	97,7	351	614
9	$P(445 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 821)$	97,7	376	634
10	$P(159 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 333)$	97,7	I74	244
II	$P(190 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 360)$	97,7	I70	275
12	$P(324 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 584)$	97,7	240	453
13	$P(266 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 447)$	97,7	I81	357
14	$P(314 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 528)$	97,7	214	421
15	$P(56 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 117)$	97,7	61	86
16	$P(144 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 223)$	97,7	79	183
17	$P(254 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 358)$	97,7	I04	306
18	$P(253 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 420)$	97,7	I67	335
19	$P(319 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 613)$	97,7	294	464
20	$P(338 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 635)$	97,7	297	487
21	$P(379 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 683)$	97,7	304	555
22	$P(412 \leq H_{\text{Без}} + 2 \leq 734)$	97,7	322	573

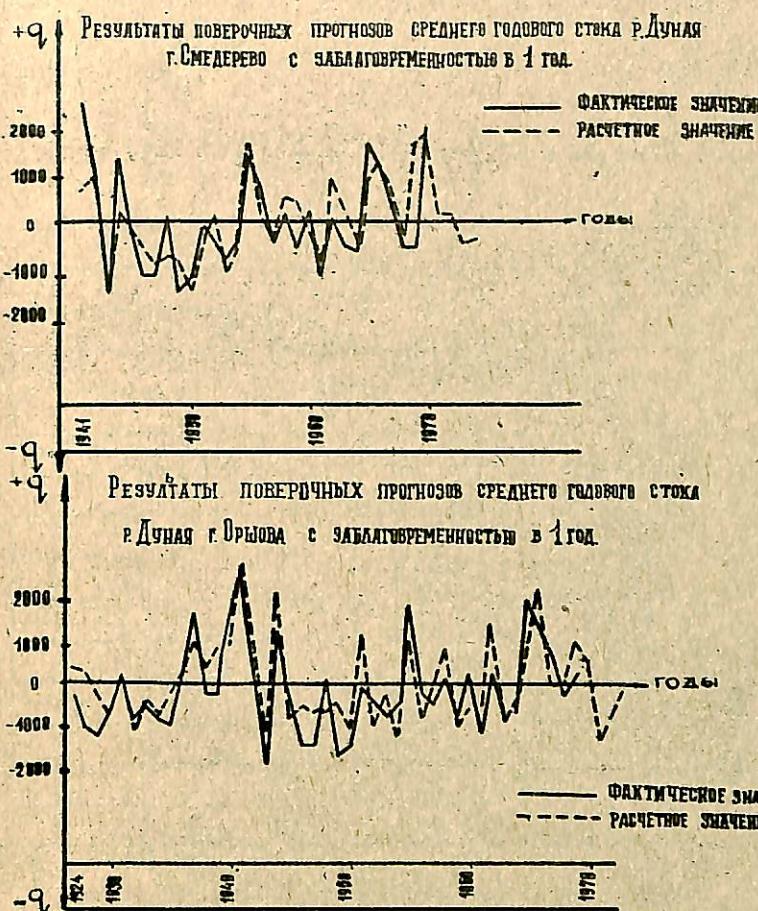


Рис. 1.

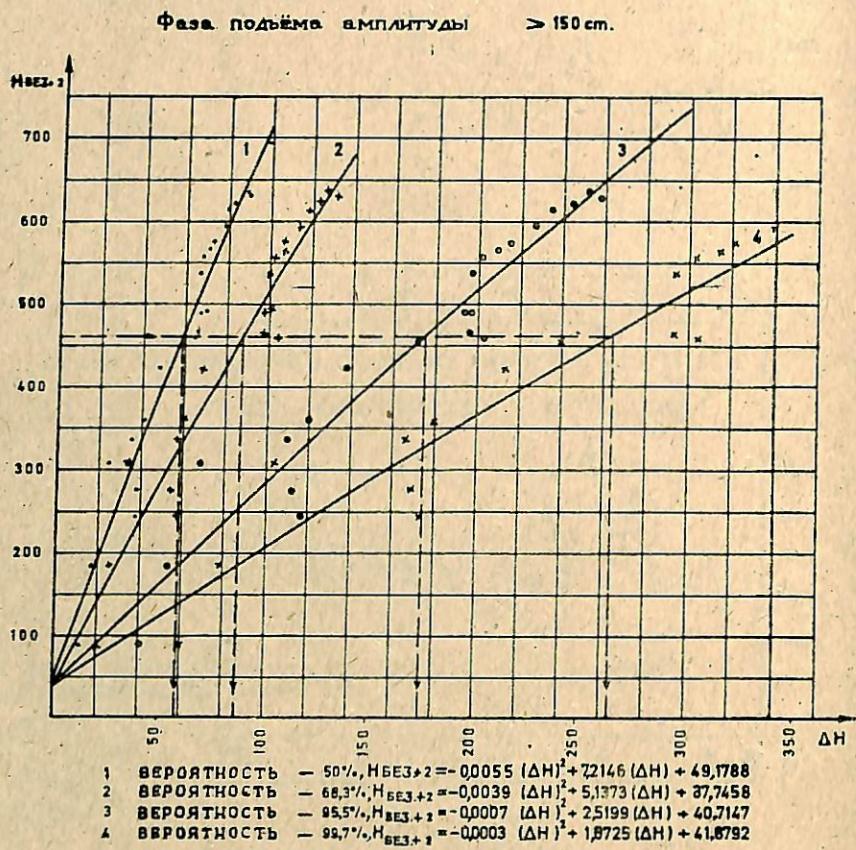


Рис. 2

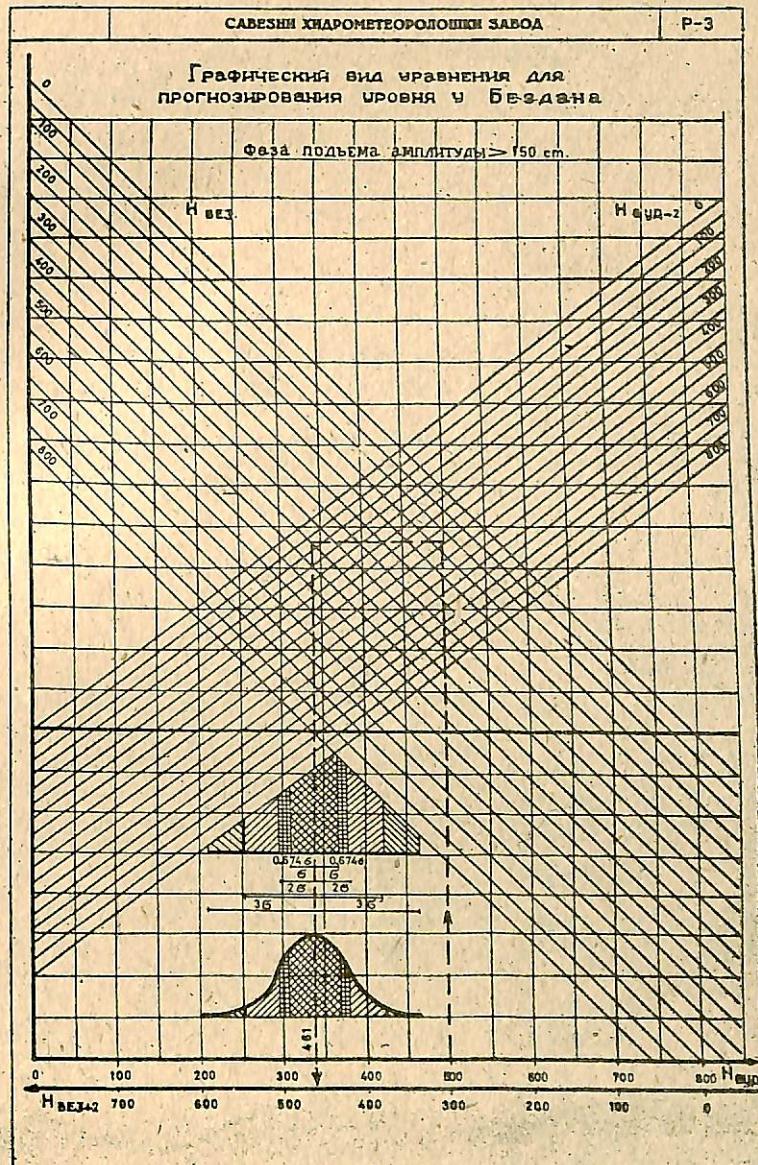
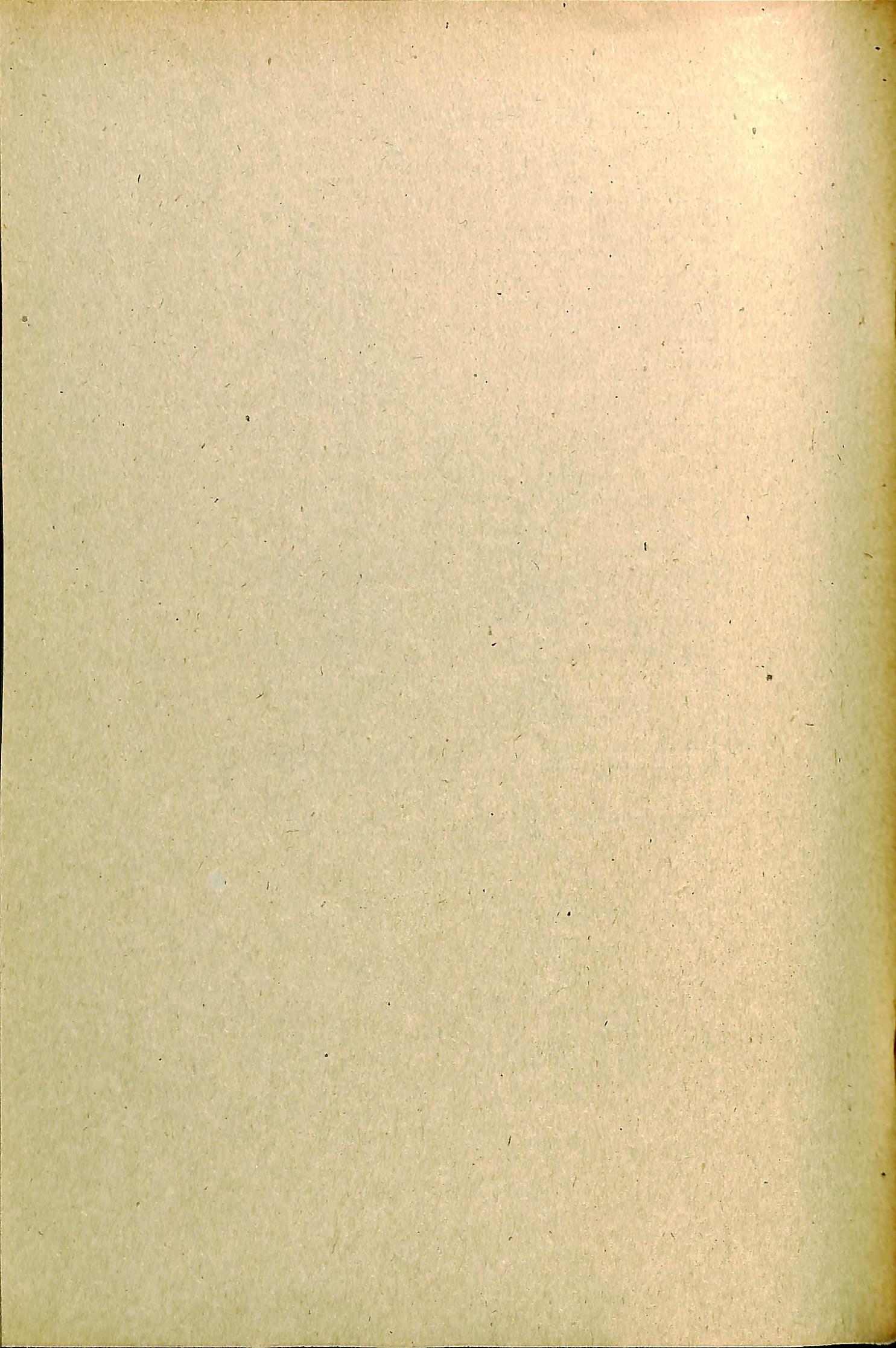


Рис. 3



ФАКТОРЫ ТАЛОГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА ВЕРХНЕЙ ТИССЫ

Г.В.ЛАВЛЕНКО

Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Киев, СССР

Р е з о м е

Для выявления возможностей прогнозирования зимо-весенних паводков выполнен анализ их формирования. В основу анализа положено сравнение суточных величин водоотдачи из снега со стоком паводков.

Расчет водоотдачи из снега произведен для разных высотных зон по снегозапасам, осадкам и температуре воздуха.

Объем стока единичных паводков выделен из много-пикововых паводков путем расчленения их на единичные с помощью кривых спада поверхностного и грунтового стока.

В качестве характеристики потерь паводочного стока приняты косвенные показатели увлажнения и промерзания почвы. Увлажнение характеризуется предпаводочным расходом воды в реке (обусловленным грунтовым питанием Q_{sp}), водоотдачей из снега за расчетный период перед паводком h_i и показателем ледяной корки K . Глубина промерзания L характеризуется данными наблюдений на метеостанциях.

Объем стока единичного паводка можно определить по уравнению $y = \Sigma h - P_o (1 - e^{-\frac{\Sigma h}{P_o}})$, где Σh — сумма суточных величин подачи талых и дождевых вод за период снеготаяния, P_o — параметр потерь, который рассчитывается по зависимости

$$P_o = f(Q_{sp}, h_i, K, L).$$

С у м м а р у

To discover the possibility of forecasting flood in winter-spring period the analysis of their formation was made. Comparison of daily values of yield of water from snow and flood run-off was the basis of the analysis.

Yield of water from snow for different high-level zones was rated by snow-reserves, precipitation and air temperature.

The volumes of run-off of individual floods are isolated out of multipeaks floods by differentiating the latter with the help of decline curves for surface and underground run-off.

Indirect indices of wetting and freezing soils characterize loss in flood run-off. The wetting is characterized by preflood water discharge in the river (that is dependent on ground alimentation, Q_{sp} , yield of water from snow for the rated period before flood, h_i , and by the index of ice-

crust, K . Depth of freezing, L , is accepted according to data, obtained from weather bureaus.

The volume of flood run-off is defined by the equation, $y = \Sigma h - P_o (1 - e^{-\frac{\Sigma h}{P_o}})$, where Σh — a sum of daily values of thawing and rain water supply for the snow-melting period; P_o — parameter of losses, rated by the relation $P_o = f(Q_{sp}, h_i, K, L)$.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Für die Feststellung der Möglichkeiten einer Vorhersage der Winter- und Frühlingshochwässer wurde eine Analyse ihrer Entstehung durchgeführt. Der Analyse liegt der Vergleich von Schneewassertagesabgaben mit dem Abfluß von Hochwässern zu Grunde.

Die Berechnung der Schneewasserabgabe wurde für verschiedene Höhenzonen nach Schneereserven, Niederschlägen und Lufttemperatur durchgeführt.

Der Umfang des Abflusses einzelner Hochwasser wurde aus den einzelnen Hochwasserspitzen durch ihre Aufgliederung in Einzelhochwasser mit Hilfe von Abfallkurven des Oberflächen- und Grundwasserabflusses ausgesondert.

Als Charakteristiken des Hochwasserabflusverlustes wurden indirekte Kennzahlen der Anfeuchtung und Durchfrierung des Bodens angenommen. Die Anfeuchtung wird durch den Wasserverbrauch im Fluß vor dem Hochwasser (bedingt durch die Grundwasserspeisung Q_{sp}), die Wasserabgabe durch den Schnee in der Berechnungszeit vor dem Hochwasser h_i und durch die Kennzahl der Eisschicht K charakterisiert. Die Tiefe der Durchfrierung L wird durch die Angaben der Beobachtung in den lokalen Stationen charakterisiert.

Der Umfang des Abflusses eines Einzelhochwassers kann nach der Gleichung $y = \Sigma h - P_o (1 - e^{-\frac{\Sigma h}{P_o}})$ errechnet werden, wobei Σh — die Summe der Tagesmengen an Tau- und Regenwasser zur Zeit der Schneeschmelze, P_o — den Parameter der Verluste, der nach dem Verhältnis $P_o = f(Q_{sp}, h_i, K, L)$ errechnet wird, darstellen.

Талый сток на реках бассейна Тиссы формируется при зимних оттепелях и весной. Таяние снега часто сопровождается дождями. Зимние паводки, возникающие обычно при кратковременных оттепелях (1-3 суток), имеют одномодальную форму, а гидрографы весеннего стока за период март-апрель - многомодальную. Такая форма обусловливается неравномерностью хода метеорологических элементов во времени и по высотным зонам в горных бассейнах.

Возникновению высоких паводков при больших осадках, снегозапасах и одновременном охвате таянием всех высотных зон благоприятствуют крутые склоны поверхности, относительно слабая водопроницаемость почв, неглубокое залегание водоупорного горизонта.

Известно [1], что сток в горах формируется и по поверхности, и в почво-грунтах бассейна.

Для выявления возможности прогноза снего-дождевых паводков выполнен анализ их формирования на примере р. Тиссы до Рахова (площадь водосбора, $F = 1070 \text{ км}^2$) и Латорицы до Мукачево $F = 1380 \text{ км}^2$). Бассейны этих рек имеют некоторую общность, черт в характере поверхности. В основу анализа положено сравнение суточных величин стока с водоотдачей из снега.

Для определения объема стока отдельных одномодальных паводков последние выделены из сложных многомодальных. Расчленение паводков произведено по схеме [5] с помощью двух типовых кривых спада стока - поверхностного и грунтового. При построении этих кривых для изучаемых рек принято, что максимум грунтового стока запаздывает по сравнению с максимумом поверхностного стока на 2 суток. Согласно схеме расчленения, в каждом из одномодальных паводков необходимо определить величины приращений над базисным стоком максимальных расходов поверхностных ΔQ_t и грунтовых $\Delta Q_{ep_{t+2}}$ вод. Форма единичных паводков на изучаемых реках при близких условиях формирования стока изменяется мало, что позволило построить обобщенную для этих рек зависи-

мость $\Delta Q_{ep_{t+2}} = f(\Delta Q_t)$ (рис. I). При ее построении использованы данные об одномодальных паводках дождевого и снегового происхождения, вызванных осадками или водоотдачей из снега длительностью около 1-2 суток. По этой зависимости и типовым кривым спада поверхностного и грунтового стока произведено расчленение сложных паводков на одномодальные за зимне-весенние периоды 1960-69 гг.

Суточные величины водоотдачи из снега определены по уравнению водного баланса тающего снега [4]. При этом суточные величины интенсивности снеготаяния m рассчитаны в зависимости от положительной температуры воздуха и даты по формуле $m = \beta t$, где β - коэффициент стаивания на один градус положительной среднесуточной температуры воздуха t (для зимних месяцев значение β принято равным 3,9, для первой, второй и третьей декад марта и для апреля - соответственно 4,2; 4,5; 4,7; 5,0). При расчете водоотдачи из снега на поверхность почвы водоудерживающая способность снега принята в соответствии с рекомендациями [4] в зависимости от плотности снежного покрова.

Расчет суточных значений водоотдачи из снега выполнен для разных высотных зон по данным о снегозапасах перед оттепелью S , осадках x и температуре воздуха t . В расчетах относительной величины покрытой снегом площади, использована кривая обеспеченности величин запаса воды в снежном покрове, характерная для лесной зоны [4]. При расчетах S , x и t использованы связи этих элементов с высотой местности (H). Зависимости $S = f(H)$, $x = f(H)$ и $t = f(H)$ построены для каждого конкретного случая по данным наблюдений в пунктах, расположенных в пределах значений H от 400 до 1400 м над уровнем моря.

Зависимости $S = f(H)$ отражают закономерность нарастания снегозапасов с высотой. В связях $x = f(H)$ эта закономерность иногда не проявляется, особенно когда осадки принимаются за короткие периоды времени (1-2 суток). Количество

осадков, выпадающих за более длительный период времени (месяц и более) почти всегда увеличивается с высотой местности.

В связи с тем, что на высотах превышающих 1400 м, наблюдения над метеорологическими элементами не ведутся, невозможно для изучаемых бассейнов определить зону максимальных осадков или снегозапасов. Поэтому высоту этой зоны мы условно приняли соответствующей отметкам наиболее высокорасположенных станций (Плай, Пожижевская). Кстати заметим, что в литературе имеются сведения, согласно которым в некоторых горных районах, например, Средней Азии, нарастание жидких осадков происходит лишь до высот порядка 1200–1600 м и убывает вплоть до нуля при 4000 м [2]. В наших расчетах значения снегозапасов и осадков для высотных зон, расположенных выше 1400 м, приняты равными данным измерений на станциях Плай и Пожижевская. Значения температуры воздуха для таких зон определены путем экстраполяции линии связи $t = f(H)$. Следует заметить, что в условиях Карпат градиенты понижения температуры воздуха с повышением местности значительно изменяются от дня ко дню, в особенности когда имеет место инверсия температуры воздуха. Причины изменчивости температурного градиента пока не выяснены, поэтому в расчетах использованы связи $t = f(H)$, построенные для каждого суток периода снеготаяния.

При расчетах водоотдачи снегозапасы S_1 на каждой высотной зоне к началу первой оттепели определены по связи $S_1 = f(H)$. Снегозапасы к началу второй оттепели S_2 определены по уравнению $S_2 = \Delta S_1 + \Sigma x_m$, где ΔS_1 – снегозапасы, оставшиеся после первой оттепели, Σx_m – сумма твердых осадков, выпавших в период между первой и второй оттепелями. Подобным образом рассчитаны снегозапасы перед каждым потеплением.

Средневзвешенная величина водоотдачи в бассейнах Латорицы (h_L) и Тиссы (h_T) определена по формулам:

$$h_L = 0,27h_{280} + 0,57h_{600} + 0,14h_{1000} + 0,02h_{1400},$$

$$h_T = 0,16h_{700} + 0,28h_{900} + 0,27h_{1100} + 0,16h_{1300} + 0,13h_{1600},$$

где коэффициенты при значениях h соответствуют долям площади каждой высотной зоны в общей площади водосбора, индексом при h – средняя высота зоны над уровнем моря.

Объем стока паводка можно определить по уравнению

$$U = \sum h - P_o \left(1 - e^{-\frac{\sum h}{P_o}} \right),$$

где $\sum h$ – сумма суточных величин водоотдачи из снега (с учетом величины жидких осадков), P_o – максимальная величина суммарных потерь талых и дождевых вод при данной впитывающей способности почво-грунтов.

При расчетах величин $\sum h$ учтено количество талой воды W_{max} , задержанной под снегом на поверхности почвы в начальный период таяния и последующая ее отдача ΔW в русовую сеть по мере усиления таяния. Величины W_{max} и ΔW определены согласно рекомендациям, изложенным в работе [3], а P_o – по специальной номограмме [7].

В бассейнах Тиссы параметр потерь P_o зависит от увлажнения и промерзания почво-грунтов. Увлажнение характеризуется нами предпаводочным расходом воды в реке, обусловленным грунтовым питанием Q_{gp} , дополнительным увлажнением бассейна за расчетный период перед паводком h_i , а также показателем ледяной корки K . Глубина промерзания почвы принята по данным наблюдений на метеостанциях.

Значение Q_{gp} определяется по схеме [5] с использованием кривых спада поверхностного и грунтового стока и зависимости $\Delta Q_{gp+2} = f(\Delta Q_t)$. Применительно к изучаемым бассейнам вместо Q_{gp} использована величина модуля грунтового стока

$$M_{gp} = \frac{Q_{gp} \cdot 10^3}{F}.$$

При определении величины h_i продолжительность расчетного периода принята равной 2 суткам, что приближенно соответствует времени добегания максимума грунтового стока. Она рассчитана по формуле:

$$h_i = 0,5h_{i-2} + h_{i-1},$$

где h – средневзвешенная по бассейну величина подачи воды на поверхность бассейна за сутки, индекс $i-n$ – время от начала паводкообразующей водоотдачи, в сутках.

Показатель ледяной корки или показатель влияния оттепельности зимы K рассчитан по схеме, изложенной в работе [6]. При этом учитывались [4] величины отрицательной температуры воздуха и оставшихся после оттепели снегозапасов. Коэффициент

K вычислен для каждой высотной зоны; для бассейна в целом принималось его средневзвешенное значение. По данным расчетов условия для формирования ледяной корки более благоприятны в нижних частях бассейна, где оставшийся после оттепели невысокий снежный покров и талая вода под ним промерзают быстрее, чем в высоких частях бассейна с большими снегозапасами. Подтвердить это предположение данными натурных измерений ледяной корки на участках снегосъемок затруднительно, т.к. эти данные весьма приближенны. За ряд одновременно выполненных снегомерных съемок на участках в нижних (около 600 м) и более высоких (около 1400 м) зонах горных бассейнов сведения о ледяной корке имеются в основном по нижним участкам.

Влияние характеристик увлажнения почвы учитывается введением их величин в зависимость $P_o = f(M_{gp}, h_i, K, L)$, построенную в соосных координатах (рис.2). На рис.2а изображен график связи параметра потерь P_o с модулем грунтового стока M_{gp} и

добавочным увлажнением h_i . Линии значений h_i , соответствующие 10, 20, 30 и 40 мм, имеют разную кривизну, что отражает разную роль влияния этого фактора при различном значении M_{sp} . В соответствии с [5], величина h_i отражает увлажнение верхних слоев почво-грунтов, а M_{sp} — увлажнение более глубоких слоев. С увеличением значений M_{sp} до 45–50 д/сек км², соответственно повышается, по-видимому, и уровень грунтовых вод, что обуславливает высокую влажность почвы во всех ее слоях, а следовательно, малые потери поверхностного и почвенно-грунтового стока. Поэтому, при дальнейшем росте величин M_{sp} влияние увлажненности верхних слоев почвы h_i уменьшается.

Рассчитанные по связи, показанной на рис.2а, величины параметра P_o значительно отличаются от фактических. Значение параметра P_o можно уточнить, если учсть характеристику оттепельности зимы K по графику (рис.2б).

Влияние глубины промерзания почвы проявляется не вполне четко (рис.2в), по-видимому, в связи с недостаточно надежным ее определением по данным всего двух станций, расположенных в нижних частях бассейнов. Однако, при наличии промерзания, например, до глубины 25–30 см, сток бывает всегда выше, чем при непромерзшей почве.

Разброс точек на графике связи обусловлен не только недостаточной точностью исходных данных, но также отсутствием возможности учета таких факторов, как изменчивость влажности почво-грунтов по бассейну, и др.

Индекс корреляции связи $P_o = f(M_{sp}, h_i, K, L)$ равен 0,8.

Дальнейшие исследования факторов талого стока в горах должны быть направлены на уточнение значений выявленных факторов, на выяснение роли таких явлений, как миграция влаги от нижних слоев почвы к верхним в условиях промерзших почво-грунтов и оттаивание почвы в процессе снеготаяния, а также на выяснение влияния распределения всех характеристик потерь по высотным зонам.

Л и т е р а т у р а

1. Бефани А.Н., Иваненко А.Г. Водный баланс горных склонов. Труды УкрНИГМИ, вып.69, 1967.
2. Геткер М.И. О некоторых закономерностях зонального распределения осадков и размещение сети осадкомеров для гидрологических целей. Труды САНИИРИ, вып.Ш, Ташкент, 1966.
3. Комаров В.Д., Макарова Т.Т., Синегуб Е.С. Расчет гидрографа половодья небольших равнинных рек на основе данных об интенсивности снеготаяния. Труды ГМЦ, вып.37, 1969.
4. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Гидрометеоиздат, Л., 1963.
5. Павленко Г.В. Формирование дождевых паводков на р.Латорице и прогноз их максимальных расходов. Труды УкрНИГМИ, вып.76, 1969.
6. Павленко Г.В. Об учете влияния показателя оттепельности зим в расчетах потерь стока рек равнинной части бассейна Днестра. Труды УкрНИГМИ, вып.104, 1971.
7. Руководство по гидрологическим прогнозам, вып. 2, Гидрометеоиздат, Л., 1963.

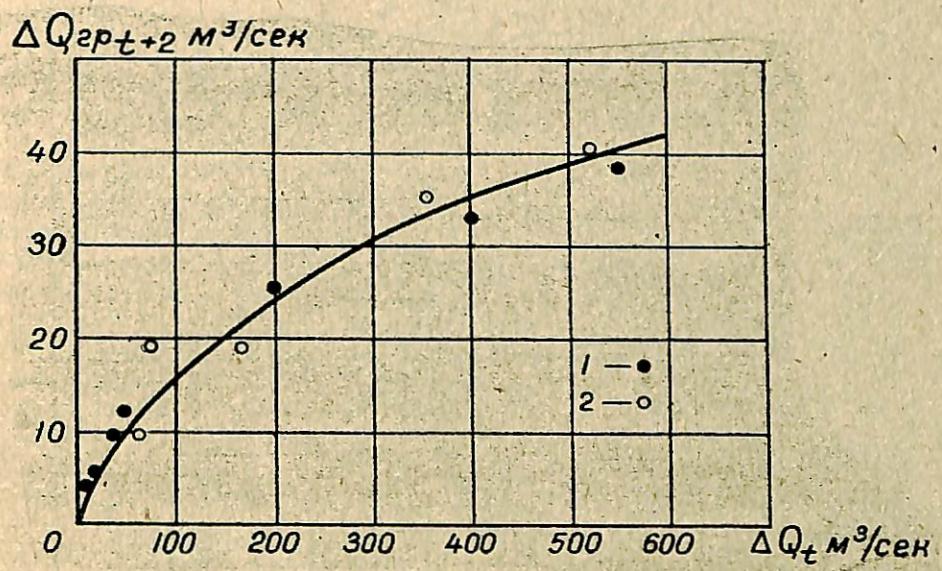


Рис. I. Связь между приращениями над базисным значением максимумов поверхностного ΔQ_t и грунтового $\Delta Q_{ep,t+2}$ стока Тиссы у Рахова (1) и Латорицы у Мукачево (2).

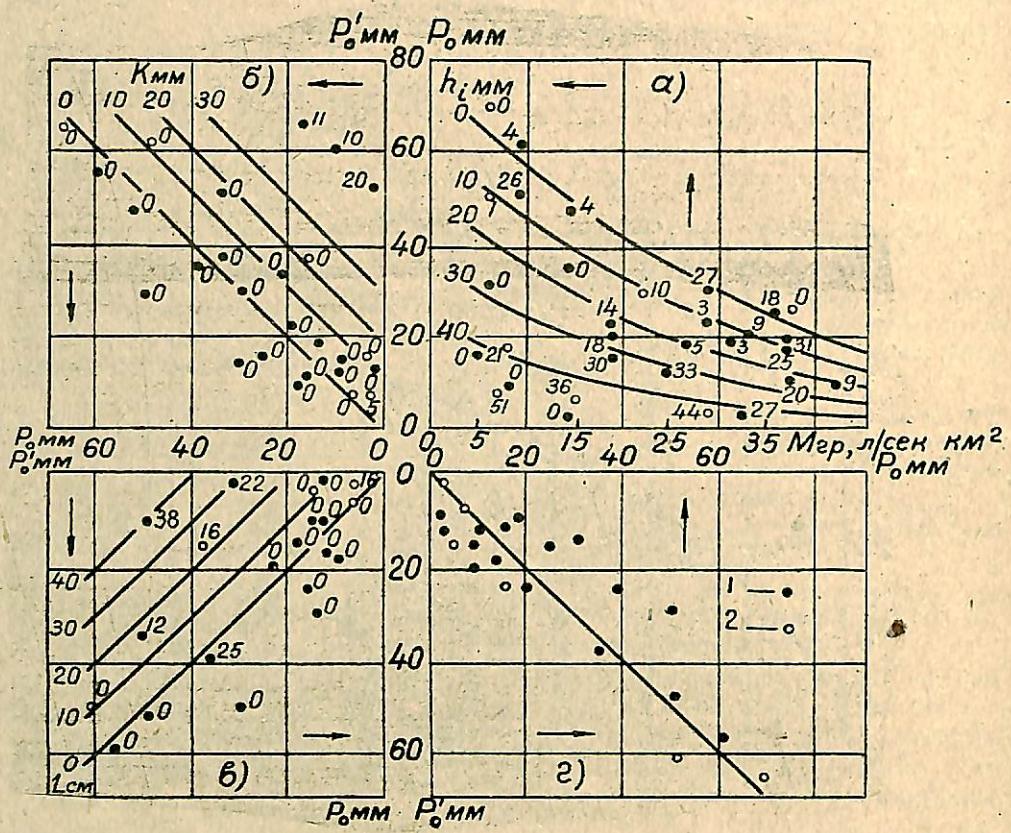


Рис.2. Зависимость параметра потерь P_o в бассейнах рек Тиссы до Рахова (1) и Латорицы до Мукачево (2) от предпаводочного модуля грунтовых вод M_{ep} л/сек км^2 , характеристики увлажнения верхних слоев почвы h_i мм, показателя ледяной корки K мм и глубины промерзания почвы L см.

P_o - параметр потерь фактический;
 P'_o - параметр потерь рассчитанный.

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПРИТОКА В ВОДОХРАНИЛИЩЕ ГЭС НА РЕКЕ
ДУНАЕ У ЖЕЛЕЗНЫХ ВОРОТ ПО ГИДРОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В.И.САЛОЖНИКОВ, В.В.КЛИМОВА

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР,
Москва, СССР

Р е з и м е

Рассматриваются способы краткосрочного прогноза притока, поступающего в водохранилище ГЭС у Железных Ворот через входные створы на Дунае, Тиссе и Саве. Ежедневный приток с различной заблаговременностью предсказывается по расходам верхних створов с учетом бокового притока на участках рек. При прогнозе гидрографа притока в водохранилище используются данные о поступлении воды в речную сеть частных площадей бассейна. Расчет добегания воды к входным створам производится с каждой площади отдельно. Объем стока на пентаду предсказывается по русловым запасам и притоку воды в речную сеть.

S u m m a r y

The paper presents methods for short-term forecasting of inflow into the reservoir of the Iron Gates hydro-electric power station through upper cross-sections on the Danube, Tissa and Sava.

Daily inflow is predicted with different periods of earliness from discharge records of upper cross-sections, with regards to the intervening area inflow to river reacher.

Data on the inflow from sub-areas into the river system are used in forecasting the hydrograph of inflow into the reservoir. Water travel time to the upper cross-sections is computed separately for each sub-area. The runoff volume for five days is predicted from channel water storage and inflow into the river system.

K u r z f a s s u n g

Es werden die Methoden der Kurzfristvorhersage des Wasserzuflusses des Stautees beim Wasserkraftwerk der Eiserne Tor durch die Flussquerschnitte der Donau, Tissa und Sawa behandelt. Der tägliche Wasserzufluss wird nach den Wassermengen der oberen Flussquerschnitte unter Berücksichtigung des Seitenzuflusses einzelner Flusstrecken für verschiedene Zeitperioden prognostiziert. Bei der Vorhersage des Zufluss-Hydrographen eines Stautees werden die Angaben über den Wasserzufluss einzelner Flächen des Einzugsgebietes ausgenutzt. Die Berechnung der Anlaufzeit des Wassers zu den Eingangsflussquerschnitten wird für jede Fläche gesondert durchgeführt. Die Abflussmengen für Pentaden werden nach den Wasservorräten im Flussbett und nach dem Wasserfluss des Flusnetzes vorher sagt.

Приток в водохранилище ГЭС у Железных Ворот слагается из расходов воды, поступающих через входные створы, расположенные на реках Дунае, Тиссе и Саве выше зонн выклинивания подпора, и бокового притока на участке водохранилища. В качестве основных входных створов приняты: Богоево на Дунае (площадь водосбора 251593 км²), Сегед на Тиссе (138408 км²) и Сремска на Саве (87996 км²). Остальная часть бассейна, равная 98000 км² или около 20 % общей площади до ГЭС, обеспечивает боковой приток. На этом участке впадает р.Морава, ее площадь до гидрометрического створа у Либичевски Мост составляет 37320 км²; другие реки небольшие.

Необходимые для обслуживания гидроэлектростанции краткосрочные прогнозы ежедневного притока через каждый входной створ составляются по расходам воды в верхних створах с учетом бокового притока на участке

$$Q_{H,n+T} = \alpha Q_{B,n} + Q_{B,n+T}, \quad (1)$$

где Q_B и Q_H - расходы воды в верхнем и нижнем створах, Q_B - расход бокового притока, отнесенный к нижнему створу, α - постоянный коэффициент, n - дата и T - заблаговременность прогноза. Расход бокового притока в уравнении (1) определяется различными способами на основе учета стекающих в русло осадков $Q_{B,n+T}(h, q_n)$, притока из впадающих рек $Q_{B,n+T}(q_n)$ и учета тенденции в изменении величин бокового притока $Q_{B,n+T}(Q_{B,n})$ [1, 2, 3]. Если, например, известную в момент прогноза величину $Q_{B,n}$ сохранить неизменной на период заблаговременности, то уравнение (1) для прогноза расходов воды на T суток принимает вид

$$Q_{H,n+T} = Q_{H,n} + \alpha(Q_{B,n} - Q_{B,n-T}). \quad (2)$$

Такие уравнения обычно дают в прогнозах хорошие результаты при небольшом изменении бокового прито-

ка за период заблаговременности. Во время больших паводков с резкими изменениями бокового притока они дают для подъема заниженные, а для спада завышенные величины ожидаемых расходов воды. Уточнение прогноза расходов воды во время таких паводков достигается благодаря раздельному учету особенностей бокового притока на подъеме и спаде. На графиках связи $Q_{B,n+T} = \beta Q_{B,n}$ принимается для подъема коэффициент $\beta > 1$, для максимальных расходов $\beta = 1$ и для спада $\beta < 1$.

Рассмотрим методику прогноза притока в водохранилище ГЭС у Железных Ворот через входные створы, например, на двое и четверо суток. Для каждого из трех входных створов на реке выбираются пункты, от которых вода достигает входного створа через двое и четверо суток. Странятся графики связи расходов верхних и нижних створов $Q_{H,n+2}(Q_{B,n})$, на них проводятся линии, огибающие точки со стороны оси расходов верхних створов. По этим линиям определяются величины α , равные тангенсу угла наклона их к оси $Q_{B,n}$. Принимая приближенно ожидаемый боковой приток равным его величине в момент прогноза, получаем прогностические уравнения (2).

Время добегания воды по руслу Дуная на участках Богоево-Бездан и Бездан-Будапешт принято равным соответственно 1 и 3 суткам. Расходы воды в створе, от которого вода достигает Богоево через двое суток, определяются посредством интерполяции расходов у Бездана Q_2 и Будапешта Q_3 с помощью выражения

$$Q_B = 0,67Q_2 + 0,33Q_3. \quad (3)$$

График связи этих величин с расходами у Богоево дает коэффициент $\alpha = 1$. Уравнение (2) для Дуная у Богоево записывается так:

$$Q_{H,n+2} = Q_{H,n} + 0,67(Q_{2,n} - Q_{2,n-2}) + 0,33(Q_{3,n} - Q_{3,n-2}). \quad (4)$$

При прогнозе расходов воды р.Тиссы у Сегеда Q_7 , с заблаговременностью двое суток в качестве верхних створов приняты Солнок на Тиссе Q_8 и Арад на р.Марош Q_9 . Зависимость (2) для Сегеда имеет вид

$$Q_{7,n+2} = Q_{7,n} + 0,88[(Q_8 + Q_9)_n - (Q_8 + Q_9)_{n-2}]. \quad (5)$$

Аналогично получено уравнение для р.Савы у Сремска Митровица

$$Q_{10,n+2} = Q_{10,n} + 0,95[(Q_{12} + Q_{14})_n - (Q_{12} + Q_{14})_{n-2}], \quad (6)$$

где индексы у расходов обозначают створы: 10 - Сремска Митровица и 12 - Славянский Брод на р.Саве, 14 - Зворник на р.Дрине. Сумма расходов воды, вычисленных по формулам (4), (5) и (6), дает общую величину притока в водохранилище через входные створы.

Для того чтобы получить уравнение, с помощью которого предсказываются расходы воды у Богоево на четверо суток вперед, надо в уравнении (4), записанном для заблаговременности $T = 4$ суток, неизвестные к моменту прогноза величины выразить через наблюденные расходы воды. Значения $Q_{4,n+2}$ в таком уравнении рассчитываются по формуле (4). Расходы $Q_{B,n+2}$ (3) выражаются по формуле (2) при $\alpha = I$.

$$Q_{B,n+2} = Q_{B,n} + (Q_{B,n} - Q_{B,n-2}). \quad (7)$$

Подставив в исходное равенство значения (3) и (7), получим

$$Q_{4,n+4} = Q_{4,n} + 0,67(Q_{2,n} - Q_{2,n-2}) + 1,33(Q_{3,n} - Q_{3,n-2}). \quad (8)$$

Для прогноза расходов воды р.Тиссы у Сегеда на четверо суток используется уравнение (5). Необходимая при этом сумма расходов воды верхних створов определяется приближенно по выражению

$$(Q_8 + Q_9)_{n+2} = (Q_8 + Q_9)_n + 0,71[(Q_8 + Q_9)_n - (Q_8 + Q_9)_{n-2}]. \quad (9)$$

В итоге соответствующих подстановок получим

$$Q_{7,n+4} = Q_{7,n} + 1,5[(Q_8 + Q_9)_n - (Q_8 + Q_9)_{n-2}]. \quad (10)$$

На основе уравнения (6) подобным образом получена зависимость для прогноза расходов р.Савы у Сремска Митровица

$$Q_{10,n+4} = Q_{10,n} + 1,6[(Q_{12} + Q_{14})_n - (Q_{12} + Q_{14})_{n-2}]. \quad (11)$$

Расходы воды в верхних створах на Тиссе и Саве можно также предсказывать на двое суток по каждому пункту отдельно, учитывая расходы других пунктов. Ожидаемый приток в водохранилище через входные створы на четверо суток вперед равен сумме расходов, вычисленных по формулам (8), (10) и (11).

Теперь рассмотрим способ прогноза притока в водохранилище по расходам верхних створов с учетом вычисленного по формуле (19) притока воды в русла на участке. Как уже отмечалось, боковой приток, отнесенный к нижнему створу, можно оценить по величине притока в русла на участке $Q_{B,n+2}(q_n)$. Подобные графики связи для р.Дуная на участках от Братиславы до Богоево показывают, что их приближенно можно выражать равенством $Q_{B,n+2} = q_n$. Тогда уравнение для прогноза расходов воды у Богоево принимает вид

$$Q_{4,n+2} = 0,67Q_{2,n} + 0,33Q_{3,n} + q_{4,n}, \quad (12)$$

где $q_{4,n}$ - приток в русла на участке двухсуточного пробега воды. Выражая приток на участке через расходы нижнего и верхнего створов, получим

$$Q_{4,n+2} = 2Q_{4,n} - Q_{4,n-1} + 0,67(Q_{2,n} - Q_{2,n-1}) + 0,33(Q_{3,n} - Q_{3,n-1}). \quad (13)$$

Таким же способом выявлены зависимости для прогноза расходов р.Тиссы у Сегеда

$$Q_{7,n+2} = 2Q_{7,n} - Q_{7,n-1} + (Q_8 + Q_9)_n - (Q_8 + Q_9)_{n-1} \quad (14)$$

и р.Савы у Сремска Митровица

$$Q_{10,n+2} = 2Q_{10,n} - Q_{10,n-1} + (Q_{12} + Q_{14})_n - (Q_{12} + Q_{14})_{n-1}. \quad (15)$$

В уравнениях (13), (14) и (15) обозначения те же, что и в (4), (5) и (6), но расходы берутся в момент прогноза n и за прошлые $n-1$ сутки.

Расходы воды у Богоево на четверо суток вперед рассчитываются по расходам у Будапешта Q_3 и притоку в русла на двух участках

$$Q_{4,n+4} = Q_{3,n} + q_{4,n} + q_{2,n}$$

или

$$Q_{4,n+4} = 2Q_{4,n} - Q_{4,n-1} + 1,34(Q_{2,n} - Q_{2,n-1}) + 1,66(Q_{3,n} - Q_{3,n-1}).$$

При прогнозе расходов воды Тиссы и Савы на четверо суток в уравнениях (14) и (15) при изменениях суммы расходов верхних створов за сутки коэффициенты берутся равными соответственно 3,8 и 2,0. Ежедневные расходы ожидаемого бокового притока в водохранилище приближенно могут быть определены по сумме расходов малых рек, впадающих в водохранилище, или более грубо по расходам р.Моравы у Любичевского Моста.

Прогноз притока в водохранилище основывается также на расчете добегания стока от верхних пунктов и притока в речную сеть с участков до входных створов. Такие расчеты производятся с помощью формулы

$$Q_{H,t} = \sum_{\tau=1}^{\tau_{MP}} Q_{B,t-\tau+1} \tau_{\tau} + \sum_{\tau=1}^{\tau_m} q_{t-\tau+1} R_{\tau}, \quad (16)$$

где Q_B и Q_H - расходы воды в верхнем и нижнем створах участка, q - приток в речную сеть с боковой площади; τ_{τ} , R_{τ} - ординаты кривых добегания воды по основному руслу и речной сети участка; τ_{MP} и τ_m - максимальное время добегания воды по основному руслу и речной сети.

Приток воды в речную сеть Дуная, вследствие неравномерных осадков и их потерь, поступает с разных участков площади бассейна неравномерно, что определенным образом оказывается на форме гидрографов паводков [5]. При прогнозе притока в водохранилище ГЭС у Железных Ворот по каждому входному створу отдельно в известной мере учитывается неравномерность распределения стока по водосбору Дуная. Влияние неравномерности поступления дождевой воды в русло по длине Дуная на ожидаемые расходы у Богоево учитывается с помощью уравнения:

$$Q_t = \sum_{i=1}^N \sum_{\tau=1}^{T_i} q_{i,t-\tau+1} R'_{i,\tau}, \quad (17)$$

где q_i — приток в речную сеть N отдельных частей бассейна, $R'_{i,\tau}$ — ординаты частных кривых добегания. Для такого расчета бассейн Дуная до Богоево разделен на три части: от истока до Братиславы (131338 км^2), от Братиславы до Будапешта (53430 км^2) и от Будапешта до Богоево (66820 км^2). Для верхней части Дуная до Братиславы и для рек Тиссы до Сегеда и Савы до Сремска Митровица приток воды в речную сеть вычисляется по уравнению баланса русловых объемов воды

$$q = Q_h \pm \frac{\Delta W}{\Delta t}. \quad (18)$$

На двух нижних участках от Братиславы до Богоево расчеты притока производятся по формуле

$$q = Q_h - Q_b \pm \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (19)$$

Русловые объемы воды, необходимые для определения их изменений ΔW за интервалы времени Δt , равные суткам, по каждой выделенной части бассейна вычисляются с помощью соотношений

$$W_1 = 0,4(Q_1 + Q_2), \quad (20)$$

$$W_{II} = 1,5(Q_2 + Q_3), \quad (21)$$

$$W_{III} = 1,5(Q_3 + Q_4), \quad (22)$$

$$W_{IV} = Q_4 + 3,0Q_5 + 6,0Q_6, \quad (23)$$

$$W_V = Q_7 + 3,0Q_8 + 2,5Q_9, \quad (24)$$

$$W_{VI} = 0,5Q_{10} + Q_{11} + 2,0Q_{12} + 4,5Q_{13} + 2,5Q_{14}. \quad (25)$$

Здесь индексы у объемов обозначают участки, у дапешт, 4 — Братислава, 5 — Линц и 6 — Регенсбург на р.Марш, 10 — Сремска Митровица, II — Арад, 12 — Славянский Брод, 13 — Радечка на Саве и 14 — Зворник на р.Дрине.

Для расчетов по формуле (17) надо знать приток q_i для каждой части бассейна и ординаты частных кривых добегания $R'_{i,\tau}$. Последние определяются

с помощью кривых добегания руслового стока на участках $\tau_i(\tau)$ и кривых добегания притока с боковой площади к нижнему створу $R_i(\tau)$ [5]. Ординаты таких кривых для выделенных частей бассейна Дуная до водохранилища приведены в табл. I. Кривые добегания руслового стока в бассейне для верхнего участка Дуная до Братиславы $R_3(\tau)$ (графа 6), для Тиссы до Сегеда $R_4(\tau)$ (графа 7) и Савы до Сремска Митровица $R_5(\tau)$ (графа 8) определены подбором в результате расчетов паводков по притоку воды в речную сеть этих частей бассейна. Кривые добегания руслового стока на участках Будапешт-Богоево, Братислава-Будапешт, $\tau_1(\tau)$ и $\tau_2(\tau)$ получены подбором при расчете трансформации расходов верхних створов к нижним для случаев прохождения паводков с минимальным боковым притоком.

Нахождение кривых $R_2(\tau)$ и $R_3(\tau)$, позволяющих рассчитать боковой приток в нижнем створе по притоку в русло с боковой площади участка, производится следующим образом. Расходы воды верхних створов при помощи кривых $\tau_2(\tau)$ и $\tau_3(\tau)$ трансформируются до нижних створов, по разности наблюденных и трансформированных расходов воды определяется боковой приток на участках. Расчеты последнего по притоку воды в речную сеть служат основой для подбора кривых $R_2(\tau)$ и $R_3(\tau)$. Заметим, что при подборе исходных кривых добегания $\tau_i(\tau)$ и $R_i(\tau)$ (табл. I) для дальнейших расчетов принимаются те из них, которые дают наилучшее соответствие между фактическими и рассчитанными гидрографами. По исходным кривым $R_1(\tau)$, $R_2(\tau)$, $R_3(\tau)$, $\tau_1(\tau)$ и $\tau_2(\tau)$ определяются частные кривые добегания $R'_2(\tau)$ и $R'_3(\tau)$ (графы 9, 10), необходимые для пересчета поступившего в русло притока соответственно с участков Дуная исток — Братислава и Братислава — Будапешт до замыкающего створа у Богоево. Достигается это в результате расчета трансформации ординат кривых $R_2(\tau)$ и $R_3(\tau)$ с помощью распределений $\tau_i(\tau)$ для нижележащих участков [5]. На нижнем участке от Будапешта до Богоево частной кривой является кривая $R_4(\tau)$ (графа 3). При неравномерности притока воды в русло использование частных кривых $R'_i(\tau)$ улучшает результаты расчета паводков в сравнении с расчетами их по средней для всего бассейна кривой $R(\tau)$.

Для прогноза расходов воды во входных створах неизвестный на последующее время приток в русло предсказывается отдельно для каждой части бассейна. Это можно делать на основе способов расчета притока в речную сеть по осадкам [1, 3, 4]. Не располагая сведениями об осадках, можно ограничиться способами учета тенденции изменения ожидаемого притока воды в русло. На период заблаговременности или часть этого периода приток можно сохранять при слабом его изменении, увеличивать при его росте или уменьшать во время спада притока. Если во время паводка приток в русло достиг максимума и по прогнозу погоды дождя не ожидается, то последующий приток оценивается по типовой кривой его

спада, полученной по ряду паводков с аналогичными условиями формирования спада. Вычисленные по расходам воды до момента прогноза и ожидаемые на последующее время величины притока в речную сеть используются для предсказания гидрографа дождевых паводков во входных створах.

Имея методику расчета стока у Братиславы, Будапешта и Богоево по расходам верхних створов и притоку в речную сеть на участках, с помощью соответствующих кривых добегания (табл. I) можно получить зависимости для прогноза расходов воды у Богоево с постоянной заблаговременностью [5]. Для этого, пользуясь данными табл. I, записываются уравнения расчета расходов воды у Братиславы, Будапешта и Богоево. Коэффициентами при Q_i и q_i в них являются значения ординат кривых добегания $\zeta_i(\tau)$ и $R_i(\tau)$. Например, для участка Будапешт-Богоево уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_{i,t} = & 0,11Q_{3,t-2} + 0,18Q_{3,t-3} + 0,21Q_{3,t-4} + 0,18Q_{3,t-5} + 0,15Q_{3,t-6} + \\ & + 0,11Q_{3,t-7} + 0,06Q_{3,t-8} + 0,07q_{i,t} + 0,20q_{i,t-1} + 0,25q_{i,t-2} + \\ & + 0,25q_{i,t-3} + 0,18q_{i,t-4} + 0,05q_{i,t-5}. \end{aligned}$$

Замена в таких уравнениях индекса времени t через $n+T$, где n - дата прогноза и T - его заблаговременность (1, 2, 3 и т.д. суток), дает уравнение с неизвестными к моменту прогноза расходами воды в реке и притока воды в русло. Ожидаемые расходы в нижнем створе каждого участка вычисляются по наблюденным расходам верхнего створа, фактическому и ожидаемому притоку воды в русло на участке реки. Неизвестные на период заблаговременности прогноза величины притока определяются с учетом его тенденции.

В табл. 2 приведены коэффициенты при расходах верхних створов ($Q_{i,n}$) и при значениях притока с отдельных частей бассейна ($q_{i,n}$) в уравнениях для расчета и прогноза расходов Дуная у Богоево с заблаговременностью до пяти суток. Эти коэффициенты получены при неизменных значениях притока, вычисленного по расходам в момент, предшествующий составлению прогноза данной заблаговременности. Во время значительных дождевых паводков приток на последующее время должен определяться по типовым кривым подъема и спада притока. Прогноз расходов воды Дуная у Богоево с заблаговременностью до пяти суток составляется путем суммирования произведений коэффициентов, приведенных в табл. 2, на соответствующие значения фактических расходов воды в верхних пунктах и притока на участках.

Пентадный приток в водохранилище предсказывается в каждом входном створе по зависимостям от фактических русловых объемов воды с учетом характеристик дополнительных масс воды, поступающих в реки за время осуществления прогноза [4]. Роль этих масс воды в формировании ожидаемого притока приближенно оценивается по величине изменения русловых объемов воды за прошлую пятидневку или по притоку в речную сеть, вычисленному по расходам воды, наб-

людающимся в момент составления прогноза. Для выявления прогностических зависимостей строятся графики связи средних пентадных расходов воды от обусловливающих их русловых объемов воды $\bar{Q}_{n+5}(W_n)$. На этих графиках со стороны оси объемов проводятся огибающие линии. Отклонения точек от этих линий отражают влияние дополнительного поступления воды в русло. Они или сохраняются на период прогноза, или графически связываются с величинами притока в речную сеть в момент прогноза. В первом случае уравнения для прогноза пентадного притока в водохранилище через створы Богоево, Сегед и Сремска Митровица соответственно принимают вид

$$\bar{Q}_{i,n+5} = \bar{Q}_{i,n-5} + 0,15(W_n - W_{n-5}),$$

$$\bar{Q}_{7,n+5} = \bar{Q}_{7,n-5} + 0,16(W_n - W_{n-5}),$$

$$\bar{Q}_{10,n+5} = \bar{Q}_{10,n-5} + 0,21(W_n - W_{n-5}),$$

во втором случае имеем

$$\bar{Q}_{i,n+5} = 0,15W_{i-\text{III},n} + 0,65q_{i-\text{III},n},$$

$$\bar{Q}_{7,n+5} = 0,16W_{V,n} + 0,23q_{V,n},$$

$$\bar{Q}_{10,n+5} = 0,21W_{VI,n} + 0,27q_{VI,n}.$$

В этих уравнениях через $\bar{Q}_{i,n-5}$ и $\bar{Q}_{i,n+5}$ обозначены средние пентадные расходы воды за прошлую и ожидаемую пятидневку. Русловые объемы воды $W_{i-\text{III}} = W_i + W_{ii} + W_{iii}$ рассчитываются по формулам (20), (21) и (22), W_V и W_{VI} - по формулам (24) и (25). Приток воды в речную сеть $q_{i-\text{III}}$ вычисляется по формуле (19), а q_V и q_{VI} - по формуле (18). При этом используются объемы воды, вычисленные по указанным выше формулам.

Ожидаемый за пентаду боковой приток, поступающий непосредственно к водохранилищу, может приблизенно определяться по сумме расходов малых рек на этом участке.

Л и т е р а т у р а

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П. и Комаров В.Д. Гидрологические прогнозы. Гидрометеоиздат, Л., 1960.
2. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неуставновившегося движения водных масс. Труды ЦИИ, вып. 66, 1958.
3. Руководство по гидрологическим прогнозам, вып. I. Краткосрочные прогнозы расходов и уровней воды на реках. Гидрометеоиздат, 1964.
4. Сапожников В.И. Прогноз стока рек в бассейне Волги по русловым запасам и притоку в речную сеть. Гидрометеоиздат, М., 1960.
5. Сапожников В.И. Учет неравномерности стока в речных бассейнах при прогнозе расходов и уровней воды. IV-ая Конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Братислава, 1967.

Таблица I

Кривые добегания для расчета трансформации стока
в бассейне Дуная

Время добрега- ния в сутках	р.Дунай					р.Тисса	р.Сава	Частные кривые добрегания	
	Будапешт- Богоево		Братислава- Будапешт		исток Братислава				
	$\tau_1(\tau)$	$R_1(\tau)$	$\tau_2(\tau)$	$R_2(\tau)$	$R_3(\tau)$	$R_4(\tau)$	$R_5(\tau)$	$R'_2(\tau)$	$R'_3(\tau)$
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0,07	0	0,15	0,10	0,06	0,10	0	0
2	0,11	0,20	0,20	0,30	0,20	0,15	0,20	0,02	0
3	0,18	0,25	0,27	0,30	0,25	0,20	0,22	0,06	0
4	0,21	0,25	0,22	0,17	0,20	0,20	0,20	0,12	0
5	0,18	0,18	0,16	0,08	0,15	0,17	0,15	0,16	0,04
6	0,15	0,05	0,10		0,10	0,12	0,09	0,18	0,06
7	0,11		0,05			0,07	0,04	0,16	0,09
8	0,06					0,03		0,13	0,12
9								0,09	0,15
10								0,05	0,15
II								0,03	0,13
I2									0,10
I3									0,08
I4									0,05
I5									0,03

Таблица 2

Коэффициенты, необходимые для расчета и прогноза расходов воды р.Дунай у г.Богоево
по расходам верхних створов и притоку в речную сеть бассейнов

Забла- говре- мен- ность (сутки) (м³/сек)	При- ток и рас- ходы	Для расчета										Для прогноза											
		$n+5$	$n+4$	$n+3$	$n+2$	$n+1$	n	$n-1$	$n-2$	$n-3$	$n-4$	$n-5$	$n-6$	n	$n-1$	$n-2$	$n-3$	$n-4$	$n-5$	$n-6$			
I	Q_1	0,07	0,20	0,25	0,25	0,18	0,05							0,27	0,25	0,25	0,18	0,05					
	Q_2		0,11	0,18	0,21	0,18	0,15	0,11	0,06					0,11	0,18	0,21	0,18	0,15	0,11	0,06			
2	Q_2	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01								0,05	0,03	0,02	0,01						
•	Q_3		0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01						0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01				
•	Q_1	0,07	0,20	0,25	0,18	0,05								0,52	0,25	0,18	0,05						
	Q_2		0,18	0,21	0,18	0,15	0,11	0,06						0,18	0,21	0,18	0,15	0,11	0,06				
3	Q_3	0,07	0,07	0,06	0,04	0,03	0,01							0,07	0,07	0,06	0,04	0,03	0,01				
	Q_2	0,02	0,06	0,08	0,07	0,04	0,01							0,16	0,07	0,04	0,01						
	Q_2		0,21	0,18	0,15	0,11	0,06							0,21	0,18	0,15	0,11	0,06					
	Q_1	0,07	0,20	0,25	0,18	0,05								0,77	0,18	0,05							
4	Q_3	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01							0,03	0,02	0,02	0,01	0,01					
	Q_3		0,11	0,12	0,09	0,06	0,03	0,01						0,11	0,12	0,09	0,06	0,03	0,01				
	Q_2	0,02	0,06	0,11	0,13	0,10	0,05	0,02						0,32	0,10	0,05	0,02						
	Q_2		0,18	0,15	0,11	0,06								0,18	0,15	0,11	0,06						
5	Q_1	0,07	0,20	0,25	0,25	0,18	0,05							0,95	0,05								
	Q_3	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01						0,08	0,04	0,03	0,02	0,01					
	Q_3		0,16	0,14	0,10	0,06	0,03	0,01						0,16	0,14	0,10	0,06	0,03	0,01				
	Q_2	0,02	0,06	0,11	0,16	0,15	0,10	0,05	0,01					0,50	0,10	0,05	0,01						
	Q_2		0,15	0,11	0,06									0,15	0,11	0,06							
	Q_1	0,07	0,20	0,25	0,25	0,18	0,05							1,0									

МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВОДООТДАЧИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА
В СТОК И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

В.А.БЕЛЬЧИКОВ, В.И.КОРЕНЬ

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР,
Москва, СССР

Р е з и м е

Водосбор рассматривается как динамическая система с сосредоточенными параметрами, входом которой является водоотдача снежного покрова, а выходом — гидограф стока в замыкающем створе. Используя физические закономерности и эмпирические положения, получены динамические уравнения этой системы. Параметры, входящие в эти уравнения, определяются с помощью методов оптимизации. Приводятся результаты проверочных расчетов гидрографов стока для нескольких рек ЕТС.

K u r z f a s s u n g

Das Einzugsgebiet wird als ein dynamisches System mit konzentrierten Parametern betrachtet. Der Eingang dieses Systems ist die Wasserabgabe einer Schneedecke und der Ausgang — der Hydrograph im unteren Flussquerschnitt. Bei der Ausnutzung von physikalischen Gesetzmäßigkeiten und empirischen Lagen werden dynamische Gleichungen dieses Systems ermittelt. Die in diese Gleichungen eingehenden Parameter werden mittels der Methoden der Optimierung bestimmt.

Für einige Flüsse des europäischen Teils der UdSSR werden die Ergebnisse der Prüfungsberechnungen von Hydrographen des Abflusses angeführt.

С у м м а г у

In the report, a watershed is considered as a dynamic system with concentrated parameters, the input of which is the water yield of snow, and the output is the runoff hydrograph in the lower outlet. The dynamic equation of this system have been obtained by using physical regularities and empirical proposition. The parameters included into these equation are determined by the methods of optimization. The results of calculation to verify of the runoff hydrographs for several rivers of the European part of the Soviet Union are given.

При построении математических моделей формирования стока, как правило, пренебрегают детализацией учета разнообразия условий формирования стока по площади водосбора и рассматривают бассейн как динамическую систему с сосредоточенными параметрами. В таком случае возникают две основные задачи: выбор структуры этой системы и определение ее параметров. Обе эти задачи тесно связаны между собой, так как усложнение модели неизбежно ведет к увеличению числа параметров, а это, в свою очередь, затрудняет их определение. В связи с этим процесс усложнения модели должен продолжаться только до тех пор, пока точность определения параметров по имеющимся данным наблюдений обеспечивает увеличение точности расчета гидрографа стока.

С другой стороны, точность определения параметров во многом определяется точностью, представительностью и объемом исходной информации. Для реальных водосборов эти показатели информации далеко не одинаковы. Поэтому модель, полученная для какого-либо конкретного водосбора, может оказаться слишком сложной (в смысле точности определения ее параметров) для другого. К тому же, в силу большого разнообразия условий формирования стока в разных физико-географических зонах, существенные процессы для одного водосбора могут оказаться не существенными для другого, вследствие чего модель может значительно видоизменяться для разных зон. Однако выделить какие именно процессы наиболее существенны для данного водосбора можно только после дополнительных исследований, связанных с постановкой трудоемких экспериментальных наблюдений в лабораторных и полевых условиях.

В наших исследованиях задача построения модели решалась следующим образом. Исходя из анализа эмпирических данных и физико-статистических зависимостей для различных локальных условий, а также из существующих теоретических представлений о процессе стокообразования на водосборе, строилась как можно более "полная" модель формирования гидрографа

стока. Затем для конкретного водосбора искалась оптимальная (в смысле точности определения параметров) модель, путем постепенного усложнения схемы расчета в рамках "полней" модели.

Коротко остановимся на выборе "полней" модели формирования гидрографа весеннего половодья. Процесс формирования этого гидрографа представляет собой взаимодействие сложных природных процессов. Главными из них являются: 1) процессы, определяющие подачу воды на поверхность бассейна, — накопление и таяние снега, водоотдача из снежного покрова и 2) процессы, определяющие преобразование поступившей на поверхность бассейна воды в гидрограф стока, — впитывание воды почвой, аккумулирование талых вод, стекание их по склонам и руслу.

Подача талой воды на поверхность бассейна определяется по данным об интенсивности снеготаяния и водоотдачи из снежного покрова с учетом относительной площади покрытия бассейна снегом. Все способы расчета интенсивности снеготаяния [3, 5, 6] различаются в зависимости от подхода к определению составляющих теплового баланса и имеют примерно одинаковую точность.

При расчетах водоотдачи снежного покрова, учитывая недостаточную изученность изменения структуры и плотности снега в период снеготаяния, разные авторы исходят из следующих допущений: 1) водоудерживающая способность снега в период снеготаяния не изменяется [3]; 2) влагоемкость снега в период снеготаяния изменяется в зависимости от ее максимальной величины и относительной убыли снега [6]. В рассматриваемой модели преобразования водоотдачи снежного покрова в гидрограф стока можно использовать любой из методов расчета интенсивности снеготаяния и водоотдачи из снежного покрова, исходя из имеющихся данных наблюдений и особенностей таяния снега в конкретном бассейне.

Преобразование графика поступления на поверхность бассейна воды в гидрограф стока сводится к решению трех задач: расчету потерь талого стока,

расчету регулирования стока поверхностью бассейна и, наконец, расчету трансформации графиков водоотдачи в гидрограф замыкающего створа.

Используя эмпирические положения, основанные на полевых и лабораторных исследованиях [1, 2, 9], для расчета потерь на инфильтрацию воды в почву принимаем следующую зависимость

$$J(t) = P(t) e^{-\left(\frac{k_3 \int_0^t P(\tau) d\tau}{f + \gamma} + \frac{k_4 S_{lk}}{\int_0^t P(\tau) d\tau}\right)}, \quad (1)$$

где $f = e^{-k_2 [1 - e^{-(k_2 L)^2}] U}$

$P(t)$ - водоподача на поверхность бассейна; L - глубина промерзания почвы; U - характеристика влажности бассейна; S_{lk} - запас воды в ледяной корке; S - максимальный запас воды в снежном покрове; $k_1, k_2, k_3, k_4, \gamma$ - эмпирические параметры. Соотношение (1) получено при следующих допущениях:

1. Интенсивность инфильтрации зависит от характеристик влажности и глубины промерзания почвы. При увеличении этих характеристик выше некоторого значений потери практически остаются постоянными.

2. Уменьшение инфильтрации со временем принято пропорциональным интегральной величине водоподачи $k_3 \int_0^t P(t) dt$. При этом считается, что на водосборе существуют такие участки, которые инфильтруют всю поступающую воду и сокращение их идет пропорционально поступлению талой воды на водосбор, причем скорость уменьшения зависит от степени промерзания и увлажненности почвы.

3. Наличие ледяной корки снижает величину потерь на инфильтрацию пропорционально относительной величине водоподачи на бассейн ($\frac{\int_0^t P(\tau) d\tau}{S}$). Последняя учитывает изменение покрытия бассейна снегом и ставание ледяной корки. Следует отметить, что такой характер зависимости инфильтрации от толщины ледяной корки допускает возможность наступления максимальной инфильтрационной способности не в момент начала водоподачи, а несколько позже.

Теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что в начальный период снеготаяния большая часть поступающей из снега воды расходуется на инфильтрацию в почву, на заполнение разного рода бессточных углублений и временно аккумулируется на поверхности бассейна в местах, откуда стекание затруднено из-за низкой водопроницаемости снежного покрова. Меньшая часть поступающей из снега воды расходуется на сток в овражно-балочную и русловую сеть.

Будем считать, что общий слой задержанной на бассейне воды за t единиц времени определяется величиной водоподачи за это же время:

$$W(t) = e^{-m \int_0^t P(\tau) d\tau} \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad (2)$$

здесь m - параметр. По мере схода снега уменьшается его способность задерживать воду, в связи с чем с некоторого момента часть аккумулированной воды начинает поступать в овражно-балочную и ручейковую сеть. Полагая, что максимально возможное количество задерживаемой воды (W_m) пропорционально запасу воды в снежном покрове к началу снеготаяния, можем считать, что момент сработки временно аккумулированной под снегом воды будет соответствовать выполнению следующего равенства

$$W_m = W(T) = \alpha S, \quad (3)$$

где α - коэффициент пропорциональности, T - момент начала сработки временно аккумулированной воды.

Как показали исследования В.Д.Комарова [3] процесс стекания временно аккумулированной воды хорошо описывается косинусгиперболическим уравнением. Поэтому мы использовали аналогичное уравнение с небольшими изменениями:

$$W'(t) = \frac{W_m}{ch^2 Z(t)}, \quad (4)$$

где $W'(t)$ - слой воды, оставшейся под снегом к моменту t , $W_m = W_m - P_3 - \int J(t) dt$ - слой временно аккумулированной воды к началу ее сработки, P_3 - потери воды на поверхностное задержание в бессточных углублениях;

$$Z(t) = \frac{\int_0^t P(\tau) d\tau}{\beta [S - \int_0^t P(\tau) d\tau]},$$

где β - эмпирический коэффициент.

Теперь водоотдачу бассейна с учетом аккумуляции талой воды на поверхности бассейна и регулирования ее поступления в русловую сеть можно рассчитать по соотношению

$$q = P(t) - J(t) - \Delta W(t), \quad (5)$$

где

$$\Delta W(t) = \begin{cases} W(t) - W(t-1) - J(t) & \text{при } W(t) \leq W_m \\ W'(t) - W'(t-1) & \text{при } W(t) > W_m \end{cases}$$

Принимая линейную модель трансформации и используя для аппроксимации функции влияния гамма-распределение, получим окончательное выражение для расчета гидрографа стока

$$Q(t) = \int_0^t \frac{1}{k \Gamma(n)} \left(\frac{t-\tau}{k} \right)^{n-1} e^{-\frac{t-\tau}{k}} q(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где $\Gamma(n)$ - гамма-функция, k, n - параметры, характеризующие трансформацию.

Полученные уравнения (1) - (6) включают II параметров, которые практически измерить невозможно, а из физических представлений можно, в лучшем слу-

чае, судить только об их предельных значениях. Поэтому для каждого конкретного водосбора они должны определяться из имеющейся информации за прошедшие годы о входных (водоотдача снежного покрова, характеристика увлажнения почвы, глубина промерзания) и выходных (гидрограф стока в замыкающем створе) характеристиках, то есть должны определяться путем решения обратной задачи. Но поскольку исходные данные могут включать значительные погрешности, а выбранная модель практически всегда неадекватна реальному процессу, такая задача будет некорректной. Следовательно непосредственно решать систему уравнений (1) - (6) относительно параметров нельзя, так как они будут получены со сколь угодно большими ошибками. В таких случаях чаще всего используются методы оптимизации [4, 7, 10], позволяющие найти такие значения параметров, при которых минимизируется некоторый функционал (критерий качества), характеризующий расхождение между фактическими и рассчитанными величинами (в нашем случае расходами воды в замыкающем створе). Возможность наложения всевозможных ограничений на систему оптимизируемых параметров позволяет учесть дополнительную информацию, не включенную непосредственно в модель, а следовательно, позволяет повысить надежность определения параметров за счет сужения области их поиска. Мы пользовались методикой оптимизации, разработанной в вычислительном центре МГУ [8], реализующей комбинацию методов, целесообразно используя их на разных стадиях минимизации и учитывая ту информацию о поведении функционала, которую может дать каждый метод.

Точность и устойчивость параметров в значительной степени определяется видом выбранного критерия качества. Он должен как можно более полно учитывать имеющуюся информацию, быть не очень чувствительным к грубым ошибкам в исходных данных и характеризовать отклонения от законов сохранения. Однако часто эти требования противоречивы. Так например, критерий, представляющий собой разность объемов фактических и вычисленных гидрографов стока, ведет к резкому уменьшению информатичности данных наблюдений, поскольку при нем гидрограф рассматривается как совокупность не привязанных ко времени точек. С другой стороны стремление учесть отклонения не только расходов воды, а и их производных приводит к увеличению чувствительности критерия качества к ошибкам в исходных данных. Поэтому при выборе критерия качества нужно исходить из особенностей конкретной задачи и точности информации. Однако можно априори сказать, что чем больше параметров включает модель, тем большее значение приобретает требование максимального учета информации.

Так как точность входных характеристик нашей модели невелика, а в отдельных реализациях могут быть грубые ошибки, мы использовали следующий критерий качества:

$$K_i = \sum_{j=1}^n \int_0^{T_i} [Q_{\phi i}(t) - Q_{pi}(X_j, t)]^2 dt, \quad (7)$$

где Q_{ϕ} , Q_p - фактические и рассчитанные расходы воды, X_j - вектор параметров, n - число реализаций (половодий), одновременно включенных в оптимизацию, T_i - длина i -ой реализации. Как показали расчеты, этот критерий качества хорошо учитывает информацию и сохранение объемов, а в силу включения в расчет n реализаций снижается чувствительность к грубым ошибкам в отдельных реализациях.

Вообще вопрос о выборе числа реализаций, одновременно включаемых в оптимизацию, является принципиальным. Часто [10] оптимизация ведется по каждой реализации отдельно, а затем для получения системы параметров, постоянной для данного водосбора, делается осреднение параметров, полученных для нескольких реализаций. Такой подход, очевидно, не позволит надежно определить все параметры модели по каждой отдельной реализации, так как из-за разнообразия условий формирования талого стока из года в год отдельные параметры могут вообще не оказывать влияния и в силу этого будут принимать случайные значения; а с другой стороны, модель будет подстраиваться под ошибки каждой реализации. Поэтому необходимо включать в оптимизацию одновременно несколько лет, характеризующихся как можно большим отличием условий формирования. Ограничением на число одновременно включаемых в оптимизацию реализаций является скорость вычислений ЭВМ. Исходя из этого мы ограничивались пятью гидрографами стока.

Проиллюстрируем возможности этих двух подходов определения постоянной системы параметров на примере р.Оки у г.Орла (площадь бассейна 4890 км²). Исходными данными служили: графики водоотдачи снежного покрова за 1947-1965 гг., полученные авторами работы [3]; характеристики увлажненности бассейна, определенные как средние арифметические по станциям Дмитровск Орловский, Орел, Карабев, Понири, причем данные по ним выбирались из "Атласа показателей степени увлажнения почвы по территории ЦЧО"; осредненные по этим же станциям глубины промерзания почвы, взятые из "карт глубины промерзания на ЕТС за 1936-1962 гг." и анистических данных; гидрографы стока у г.Орла.

Для оптимизации было выбрано пять лет, характеризующихся большим разнообразием основных характеристик, влияющих на формирование гидрографа (см. табл. I), а остальные 14 половодий использовались для проверочных расчетов.

Как видно из таблицы, основные характеристики за выбранные пять лет изменяются в широких пределах относительно средних значений за 19 лет. Особенно экстремальным является 1963 год, в котором коэффициент стока (η) был равен 0,98.

Совпадение фактических гидрографов для выбранных лет с рассчитанными по параметрам, полученным

в результате оптимизации, соответственно по каждому из этих лет очень хорошее, причем суммарный критерий качества (K) равен 98. Гидрографы же, рассчитанные по осредненным за эти пять лет параметрам, получились значительно хуже ($K = 2369$). Исключение из осреднения 1963 г. заметно улучшает результаты ($K = 695$), однако достичь критерия качества, полученного в результате одновременной оптимизации по этим пяти годам ($K = 415$), не удалось. Для независимой выборки сохраняется та же картина.

Следовательно включение в выборку для осреднения параметров 1963 г. привело к сильному искажению результатов расчета, в то время, как одновременная оптимизация по пяти годам (включая 1963 г.) позволила достаточно устойчиво определить параметры. Исключение из осреднения 1963 г., хотя и привело к улучшению результатов (по сравнению с осреднением по пяти годам), но не может быть рекомендовано как правило, так как мы не всегда можем оценить точность того или иного гидрографа, а следовательно не можем установить целесообразность его исключения из выборки.

Проведенное исследование позволило нам в дальнейшем для получения постоянной системы параметров использовать одновременную оптимизацию по реализациям.

Таким способом были получены параметры для трех небольших водосборов на ЕГС. Совпадение фактических и рассчитанных гидрографов для них получилось достаточно хорошее, как для оптимизированных лет, так и для независимых. При этом оптимизация велась, как отмечалось выше, путем постепенного усложнения модели.

Наиболее простая модель включала три параметра k_1 , k_3 , n , то есть вводился постоянный для всех лет коэффициент стока, который в соответствии с (I) равен $\eta = 1 - e^{-k_3}$. В дальнейшем учитывались характеристики влажности (параметр k_3) и глубина промерзания (параметр k_2). В этих моделях коэффициент стока меняется от года к году в зависимости от L и U , но остается постоянным в течение всего времени формирования половодья. Для учета динамики этого коэффициента вводилась величина $\int P(\tau) d\tau$. Последующее усложнение модели достигается за счет учета регулирования временно задержанной на бассейне воды (параметры m , α , β), воды, аккумулированной в бессточных углублениях (P_3) и ледяной корки (параметр k_4). В табл. 2 приведены полученные параметры и критерии качества по оптимизированным годам (K) и суммарные для всей выборки (ΣK) для разных по сложности моделей по данным р. Оки у г. Орла.

Из таблицы 2 видно, что включение в оптимизацию параметров P_3 и k_4 (см. графы 8 и 9) дало незначительное улучшение по оптимизируемым годам, в то время как для проверочных лет критерий увеличился. Следовательно вводить их в окончательную модель преобразования водоотдачи снежного покрова

в гидрограф стока нецелесообразно. Принятой системой параметров для р. Оки у г. Орла будут параметры, приведенные в графе 7 этой таблицы: Расчеты для 14 независимых лет по этим параметрам показали удовлетворительную сходимость фактических и рассчитанных гидрографов стока. На рис. I приводятся гидрографы стока для конкретного года, причем рассчитанные гидрографы показаны по мере усложнения модели.

Л и т е р а т у р а

1. Калинин Г.П., Макарова Т.Т. Исследование некоторых вопросов стока весеннего половодья. Труды ЦИИ, вып. 94, 1959.
2. Комаров В.Д. Лабораторные исследования водопроницаемости мерзлой почвы. Труды ЦИИ, вып. 54, 1957.
3. Комаров В.Д., Макарова Т.Т., Синегуб Е.С. Расчет гидрографа половодья небольших равнинных рек на основе данных об интенсивности снеготаяния. Труды ГИИ, вып. 37, 1969.
4. Корень В.И., Кучмент Л.С. Применение методов оптимизации к построению математической модели формирования паводков. Метеорология и гидрология, № II, 1969.
5. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Гидрометеоиздат, Л., 1961.
6. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Гидрометеоиздат, М., 1963.
7. Поляк Б.Т., Скоков В.А. Подбор параметров кинетических уравнений по экспериментальным данным. Сборник "Вычислительные методы и программирование", вып. 9, изд. МГУ, 1967.
8. Поляк Б.Т., Скоков В.А. Стандартная программа минимизации функции многих переменных (для машины М-20), вып. ГУ, изд. МГУ, 1967.
9. Харченко С.И. Исследование потерь и добегания талых вод. Труды ГГИ, вып. 57(III), 1956.
10. LICHTY R.W., DAWDY D.R. and BERGMANN J.M. Rainfall-runoff model for small basin flood hydrograph simulation. The use of analog and digital computers in hydrology. Tucson, Arizona, December 1968, vol. 11, Publ. 81, AJHS.

Таблица I

№ п.п	Годы	S мм	u мм	L см	ζ
1	1957	141	78	17	0,28
2	1959	70	112	67	0,77
3	1960	140	90	90	0,76
4	1963	120	87	93	0,98
5	1964	188	58	100	0,48
6	средние за 1947-1965 гг.	109	87	74	0,66

Таблица 2

Параметры	Размерность	Полученные значения в результате оптимизации.							
		k, k_3, n	k, k_3, n, k_1	k, k_3, n, k_1, k_2	$k, k_3, n, k_1, k_2, \gamma$	$k, k_3, n, k_1, k_2, \gamma, m, \alpha, \beta$	$k, k_3, n, k_1, k_2, \gamma, m, \alpha, \beta, P_3$	$k, k_3, n, k_1, k_2, \gamma, m, \alpha, \beta, P_3, k_4$	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	
k	час	17,0	19,4	16,1	10,6	19,9	17,5	19,4	
k_3	$\frac{1}{мм}$	0,912	0,321	0,260	0,0019	0,0021	0,0021	0,0017	
n	-	6,27	5,43	6,47	7,98	4,10	4,42	4,05	
k_1	$\frac{1}{мм}$		0,0521	0,0912	0,112	0,117	0,108	0,127	
k_2	$\frac{1}{мм}$			0,0016	0,0033	0,0031	0,0029	0,0023	
γ	-				0,0057	0,0057	0,0059	0,0079	
m	$\frac{1}{мм}$					0,0010	0,0009	0,0009	
α	-					0,231	0,310	0,310	
β	-					0,447	0,241	0,236	
P_3	мм					4,0	0,0050	0,0013	
k_4	$\frac{1}{мм}$							0,187	
K	$мм^2$	832	729	415	312	255	204	202	
ΣK	$мм^2$	1863	1739	1431	965	886	950	992	

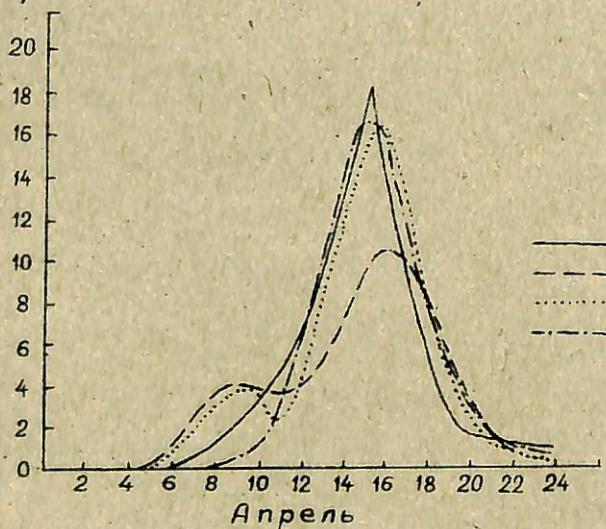
 q_j мм/сутки

Рис. I. Гидрографы стока р.Оки у г.Орла в 1952 г.
1 - фактический;
2 - k, k_3, n ;
3 - $k, k_3, n, k_1, k_2, \gamma$;
4 - $k, k_3, n, k_1, k_2, \gamma, m, \alpha, \beta$.

АНАЛИЗ И УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АСИНХРОННОСТИ СТОКА И ОСАДКОВ В БАССЕЙНАХ ДУНАЯ, ДНЕСТРА И ДНЕПРА

И.А.ЖЕЛЕЗНИК, М.М.ВОРОНЧУК, Ю.В.ШВЕЙКИН

Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Киев, СССР

Р е з и м е

Теоретической основой для анализа и учета пространственно-временной асинхронности гидрометеорологических явлений служат кривые обеспеченности и стохастические матрицы.

Степень асинхронности в колебаниях годового и сезонного стока рек Дуная, Днестра и Днепра оказалась незначительной, ее учет целесообразен только в очень маловодные годы; асинхронная добавка к сумме объемов годового стока 95 %-ной обеспеченности составляет около 13 км³.

Асинхронность выявлена между колебаниями стока основных рек УССР и ходом осадков, выпадающих в зонах орошения водами этих рек. Учет этой асинхронности может служить основанием для уменьшения расчетного ирригационного забора воды из рек в очень маловодном году на 20-30 %.

Отмечена заметная асинхронность в колебаниях осадков в придунайских странах: очень засушливому периоду вегетации на Украине с высокой степенью вероятности соответствуют средние по влажности и засушливые периоды вегетации в остальных странах.

С у м м а р у

Theoretical basis for analysis and registration of space-time asynchrony of hydrometeorological phenomena are security curves and stochastic matrices.

Degree of asynchrony of annual and seasonal runoff of the Danube, the Dniester and Dnieper appeared to be insignificant, its registration is expedient only in very low-water years: asynchronous addition to the sum of volumes of yearly runoff of 95% security amounts about 13 km³.

Asynchronous are fluctuation of run-off of main rivers in the Ukrainian SSR and precipitations

fell in areas irrigated by the water of these rivers. The registration of this phenomenon may be a reason for decreasing the rated irrigation water-in-take in very low-water years by 20-30%.

Appreciable asynchrony in precipitation fluctuations in the Danube countries are observed: very arid period of vegetation in the Ukraine with high degree of probability is corresponded by medium-humid arid period of vegetation in the rest of countries.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Als theoretische Grundlage für die Analyse und Berechnung des räumlichen und zeitlichen Asynchronismus hydrometeorologischer Erscheinungen dienen die Versorgungskurven und stochastischen Matrizen.

Der Grad des Asynchronismus in den Schwankungen der Jahres- und Saisonsabflüsse der Donau, des Dnestr und Dnjepr hat sich als unbedeutsam erwiesen, ihre Berechnung ist nur in wasserarmen Jahren zweckmäßig; die Asynchronzugabe zur Summe des Jahresabflusses einer 95%-igen Versorgung beträgt ca. 13 km³.

Der Asynchronismus wurde aus den Schwankungen der Abflüsse der Hauptwasserläufe der USSR und dem Verlauf der in den Einzugsgebieten dieser Wasserläufe fallenden Niederschläge ermittelt. Die Rivalenz dieses Asynchronismus kann als Grundlage für die Herabsetzung der rechnerischen Entnahme von Wasser aus diesen Flüssen für Bewässerungszwecke in einem sehr wasserarmen Jahr auf 20-30% dienen.

Es wurde ein merklicher Asynchronismus in den Schwankungen der Niederschläge der Donauländer vermerkt: einer sehr unter der Dürre leidenden Vegetationsperiode in der Ukraine entsprechen mit einem hohen Wahrscheinlichkeitsgrad Feuchtigkeitsmittelwerte und auch Dürreperioden der Vegetation in den übrigen Ländern.

Ввиду вероятного дефицита водных ресурсов на юго-западе Европейской территории Союза проектные организации рассматривают различные варианты переброски на Украину стока со смежных территорий, в том числе стока северных рек ЕС, а также более полного использования вод р.Дуная, для чего проектируется частичная их переброска в р.Днепр. В связи с разработкой подобных проектов возникла необходимость исследования и учета особенностей колебаний годового и сезонного стока рек Дуная, Днестра и Днепра.

Преимущественную часть меженных вод Дуная планируется использовать на орошение земель в засушливых районах придунайских стран. При асинхронном сопряжении осадков за период вегетации, когда засушливость в этих районах наступает не одновременно, водозабор, близкий к расчетному, будет осуществляться в разные годы, вследствие чего условия распределения стока между придунайскими странами будут более благоприятными. Это подтверждает актуальность и важность исследования особенностей сопряжения осадков, выпадающих в придунайских странах, в течение периода вегетации.

Детальные исследования пространственно-времен-
ной сопряженности стока отдельных рек, стока с осадками, осадков в придунайских странах основаны на применении стохастических матриц. Методика их построения подробно изложена в работах [1, 2], здесь мы только отметим, что их расчет содержит построение матрицы эмпирической вероятности P_e появления расходов в пределах определенных интервалов их значений (интервалов осреднений) и матрицы теоретической вероятности появления расходов в тех же интервалах P_t , вычисленной из предположения, что расходы сравниваемых рек изменяются независимо друг от друга. Условия сопряжения стока сравниваемых рек отражает коэффициент коллигации $\lambda = P_e : P_t$, который тем больше, чем больше теснота связи стока разных рек в пределах данного интервала.

Ход изолиний коэффициента коллигации характеризует особенности сопряжения сравниваемых элементов. Степень достоверности выводов, которые можно сделать по коллигационной матрице, зависит от амплитуды изменения расходов, принятых интервалов осреднения и шага скольжения (смещения интервала осреднения) и, прежде всего, продолжительности обоснованных выводов она не должна быть менее 50–60 лет. В качестве иллюстрации на рис. 1а помещена коллигационная матрица сопряжения годового стока Днепра с годовым стоком Дуная. На матрице в левом верхнем углу нанесены минимальные значения расходов, они увеличиваются слева направо (р.Днепр) и сверху вниз (р.Дунай).

Диагональное расположение рабочей части матрицы сопряжения Днепр–Дунай подтверждает значительную синхронность стока этих рек при низкой и высокой водности и его асинхронность в центральной части матрицы. Аналогична форма таких же матриц, построенных по данным о весеннем стоке и стоке за период вегетации.

Однако для проектных решений приведенный качественный анализ недостаточен. Необходимы параметры объективной количественной оценки степени сопряжения стока. Таким параметром может быть асинхронная добавка стока заданной обеспеченности в виде разности расходов $\Delta Q_p = Q_{p,x} - Q_{p,c}$ (в $m^3/\text{сек}$) или объемов стока $\Delta S_p = S_{p,x} - S_{p,c}$ (в km^3). Они подсчитываются по кривым обеспеченности суммарного стока, для чего используется графическое построение, которое представляет возможность многостороннего анализа особенностей сопряжения стока сравниваемых рек.

Подробное обоснование многоосного расчетного графика, описание порядка его построения и пользования им помещены в работе [6]. Помимо кривых обеспеченности суммарного хронологического и синхронного (равнообеспеченного) стока, которые ввел в практику исследований и расчетов асинхронности Н. В. Сомов [5] и взаимное расположение которых опре-

деляет асинхронную добавку стока ΔQ_p , много-осный график содержит несколько построений, которые позволяют решать различные вопросы расчетов сопряженного стока.

Кривые обеспеченности суммарного независимого стока (исчисляя в предположении, что колебания расходов рек не зависят друг от друга) и асинхронной суммы (сумма двух расходов противоположной обеспеченности P и $100 - P$) позволяют оценить степень генетической обусловленности водности рек: чем ближе кривая хронологического стока к кривой асинхронного стока, тем меньше расходы сопрягаемых рек обусловлены общими генетическими факторами. Кривые обеспеченности стока каждой из сравниваемых рек и линии равных расходов в пределах рабочей зоны построения дают возможность по известной величине (обеспеченности) стока одной реки и заданному суммарному хронологическому стоку определить величину (обеспеченность) стока другой, по заданному расходу одной реки определить соответствующую ему обеспеченность различных значений стока другой и решать другие задачи.

Анализ построения, выполненного для Днепра и Дуная (рис.2), свидетельствует о синхронности их стока (кривая хронологического стока ближе к кривой синхронного, чем независимого стока), поэтому при $P = 95\%$ $K_{ac} = 1,03$, хотя абсолютная величина асинхронной добавки $\Delta S_{95\%} = 7,2 \text{ км}^3$ — составляет ощущимую величину.

Анализ параметров сопряженности рассмотренных рек (табл. I) показывает, что учет особенностей пространственно-временной сопряженности рек юго-запада не дает заметного увеличения их водных ресурсов. Рассчитывая водохозяйственный баланс для среднемаловодного года при совместном использовании стока этих рек (например, в связи со строительством канала Дунай-Днепр) этим увеличением можно пренебречь, поскольку учет асинхронности дает увеличение суммарного расхода всего на 2-6%, и, следовательно, асинхронная добавка стока соизмерима с точностью исчисления расходов воды.

В расчетные очень маловодные годы асинхронная добавка стока рек юго-запада достигает 9% и ее можно принимать во внимание, если водохозяйственный баланс рассматриваемой территории будет иметь дефицит стока такого же порядка, и не предусматривать переброски стока извне.

Закономерности сопряжения транзитного стока Дуная, Днепра и Днестра с осадками в засушливых районах в бассейнах этих рек установлены по многолетним данным об осадках и стоке не только за период вегетации, но и за год соответственно. Последнее целесообразно, учитывая регулирование стока в водохранилищах на Днепре и проектируемых водохранилищах на других реках.

В начале исследования асинхронность стока и осадков устанавливалось анализом хронологических графиков хода стока и осадков и сравнением различных интегральных кривых, как это подробно описа-

но в работе [3], а также анализом коллигационных матриц сток-осадки, которые были построены для всех бассейнов и наглядно характеризовали условия сопряженности в пределах всей амплитуды изменения сравниваемых явлений [2]. Этот анализ подтвердил наличие асинхронности стока и осадков для всех рек юго-запада. Затем был выполнен количественный анализ, который содержал определение обеспеченностей стока P_Q и осадков P_H в группе очень маловодных лет ($P_Q \geq 90\%$), подсчет оросительных норм для каждого года этой группы M , средней оросительной нормы для всей группы M_{cp} и коэффициента асинхронности стока и осадков $K_{aco} = M_{cp} : M_{95\%}$. В табл.2 помещен результат расчета K_{aco} для бассейна рек Дуная, Днестра и Днепра.

Расчет показал, что в очень маловодные годы сопряженность стока и осадков в зоне орошения, например, в бассейне Днестра, характеризуется некоторой асинхронностью: при изменении обеспеченности годовых величин стока очень маловодных лет в пределах 90-100%, чему соответствует средняя величина $P_Q \approx 95\%$, обеспеченность осадков колеблется в более значительных пределах (12-94%) при средней $P_H = 58\%$. Разности $P_Q - P_H = 37\%$ соответствует и средняя оросительная норма, величина которой на 32% менее расчетной: $M_{95\%} = 4250 \text{ м}^3/\text{сек}$ при $P_H = 95\%$.

Наиболее полное представление об особенностях сочетания стока и осадков в пределах всей амплитуды их изменения дает коллигационные матрицы. Форма этих матриц свидетельствует о существовании асинхронности стока и осадков в зонах орошения водами Дуная, Днестра и Днепра; ее количественным показателем является коэффициент асинхронности K_{aco} , вычисленный при помощи матриц условной асинхронности $P(H/Q)$ (рис.3).

Методика расчета матриц $P(H/Q)$ подробно описана в работе [1]. Здесь вкратце отметим, что такая матрица представляет собой поле распределения условной обеспеченности осадков по стоку, вычисленной по формуле

$$P(H/Q) = \frac{m_{i,j} - 0,3}{n_j + 0,4},$$

где $m_{i,j}$ — количество случаев, когда осадки были не меньше верхней границы интервала i при условии, что сопутствующая им величина стока Q попадала в интервал j ; n_j — количество случаев попадания Q в интервал j .

Чтобы определить коэффициент асинхронности стока и осадков K_{aco} для каждой зоны орошения по исходным данным рассчитаны две матрицы условной обеспеченности: осадков по годовому стоку и осадков по вегетационному стоку. На каждой матрице построены кривые обеспеченности стока и осадков $Q(P)$ и $H(P)$, которые дают возможность для заданной безусловной обеспеченности стока P_Q , равной 75% и 95% и различных условных обеспечен-

ностей осадков $P_{y,H}$, равной 50, 75, 90 и 95 % по кривым $H(P)$ для принятых значений P_Q определить величины и им соответствующие безусловные обеспеченности осадков P_H . Зная эти обеспеченности, по интерполяционным графикам $M_p = f(P)$, устанавливаем средние для зоны оросительные нормы M_p и подсчитываем коэффициенты асинхронности $K_{aco} = M_p : M_{95\%}$. Аналогичные расчеты позволили установить коэффициенты K_{aco} для всех зон орошения в бассейнах основных рек юго-запада.

Величина коэффициента асинхронности зависит от принятой условной обеспеченности осадков. Последняя определяет повторяемость перебоев в работе оросительных систем. Принимая обеспеченность речного стока $P_Q = 95\%$ мы этим допускаем возможность перебоев из-за недостатка воды в реке 5 раз в 100 лет ($p(Q) = 0,05$). Нормативы по расчету оросительных систем предусматривают в качестве расчетной такую же обеспеченность осадков $P_H = 95\%$.

Если осадки в зоне орошения и транзитный сток рассматривать как явления независимые, то повторяемость совпадения в одном году расчетного маловодья и такой же засухи составит $P = P_Q \cdot P_H = 0,0025$ (1 раз в 400 лет). В действительности же, хотя и не во всем диапазоне изменений, но связь между указанными осадками и стоком есть. Учитывая результаты анализа и принимая во внимание, что большие величины гарантируют более осторожное решение задачи, рекомендуем в качестве расчетных значения коэффициент асинхронности при $P_H = 75\%$ (табл.3) как для учета особенностей сопряжения с осадками годового стока, так и стока за период вегетации.

Сопряженность осадков в придунайских странах исследована по данным об осадках за период вегетации (апрель-сентябрь) на юге Украины и равнинных частях территории Болгарии, Румынии, Венгрии и Чехословакии. Они освещают характер увлажнения за 70-73 годы - с 1891 по 1960-1963 гг.

Детальная количественная оценка асинхронности рассматриваемых величин была выполнена по матрицам условной обеспеченности осадков в зарубежных странах при фиксированной безусловной обеспеченности осадков на юге УССР соответственно для $P_{H,y}$ и $P_H = 95, 75$ и 50% .

Сравнение указанных величин показало, что когда на Украине осадки за период вегетации близки к средним, в остальных странах осадки за этот период могут иметь различные значения. Однако, если принять в качестве достаточной условную обеспеченность $P_{H,y} = 75\%$, то со средней повторяемостью 1 раз в 80 лет очень засушливому периоду вегетации на Украине соответствует период вегетации с осадками, близкими к средним, в Болгарии ($P_H = 57\%$) и Чехословакии ($P_H = 67\%$), а также среднезасушливый период в Румынии и Венгрии.

Все изложенное дает основание сделать вывод, что в период вегетации очень низким осадкам на юге

УССР сравнительно часто соответствуют средние (иногда и высокие) осадки в других странах; одновременная засуха во всех рассмотренных придунайских странах отмечалась в прошлые годы, но как явление крайне редкое.

Л и т е р а т у р а

1. Ворончук М.М. К анализу и учету пространственно-временной сопряженности гидрометеорологических явлений с помощью стохастических матриц. Труды УкрНИГМИ, вып.97, 1970.
2. Ворончук М.М., Швейкин Ю.В. Метод исследования асинхронности колебаний гидрометеорологических явлений с помощью стохастических матриц. Труды УкрНИГМИ, вып.85, 1969.
3. Железняк И.А., Левковский С.С., Швейкин Ю.В. Об асинхронности осадков в зоне орошения и водности р.Днепра. Ж. "Гидрот. и мелиор." № 10, 1967.
4. Железняк И.А. Особенности пространственно-временной сопряженности стока и осадков и их учет при проектировании водохозяйственных мероприятий на территории Украины и Молдавии. Труды УкрНИГМИ, вып.97, 1970.
5. Сомов Н.В. Асинхронность и цикличность колебаний стока крупных рек СССР. Труды ЦИП, вып.II7, 1963.
6. Швейкин Ю.В., Ворончук М.М. Методика исследования и учет асинхронности колебаний годового стока рек. Труды УкрНИГМИ, вып.80, 1969.

Таблица I

Коэффициенты асинхронности стока рек K_{ac} , асинхронная добавка расхода ΔQ ($m^3/\text{сек}$) и объема стока ΔS (km^3)

Реки и объединение рек	Период наблюдений		Параметры	Маловодные ($P = 75\%$)		Очень маловодные ($P = 95\%$)	
	от - до	число лет		Год	Период вегетации (IV-IX)	Год	Период вегетации (IV-IX)
I	2	3	4	5	6	7	8
Дунай - Днепр	1838-1964	127	K_{ac}	1,02	1,05	1,03	1,08
			ΔQ	110	240	230	440
			ΔS	3,5	3,8	7,2	6,9
Дунай - Днестр	1921-1964	44	K_{ac}	1,02	1,02	1,05	1,03
			ΔQ	100	140	210	150
			ΔS	3,2	2,2	6,6	2,4
Дунай - Днестр + Бессарабский Буг + Днепр	1921-1964	44	K_{ac}	1,03	1,07	1,08	1,07
			ΔQ	200	500	420	440
			ΔS	6,3	7,9	13,2	7,1

Таблица 2

Коэффициенты асинхронности стока и осадков, вычисленные по средней оросительной норме в группе очень маловодных лет ($P_Q = 95\%$)

Бассейны рек	$M_{95\%}$	По годовому стоку			По стоку за период вегетации		
		средняя обеспеченность осадков P_H , %	средняя оросительная норма, M_{cp} , $m^3/\text{га}$	$K'_{aco} = \frac{M_{cp}}{M_{95\%}}$	средняя обеспеченность осадков P_H , %	средняя оросительная норма, M_{cp} , $m^3/\text{га}$	$K'_{aco} = \frac{M_{cp}}{M_{95\%}}$
Дунай	4700	55	3390	0,72	47	3000	0,64
Днестр	4250	60	2980	0,70	61	3000	0,70
Днепр	4600	60	3200	0,70	51	2900	0,63

Таблица 3

Расчетные коэффициенты асинхронности стока и осадков в зонах орошения

Обеспеченность стока	Зоны орошения из рек		
	Дунай	Днестр	Днепр
I	2	3	4
А. Годовой сток - осадки			
75	0,85	0,65	0,60
95	0,80	0,75	0,75
Б. Сток за период вегетации - осадки			
75	0,90	0,65	0,65
95	0,65	0,70	0,70

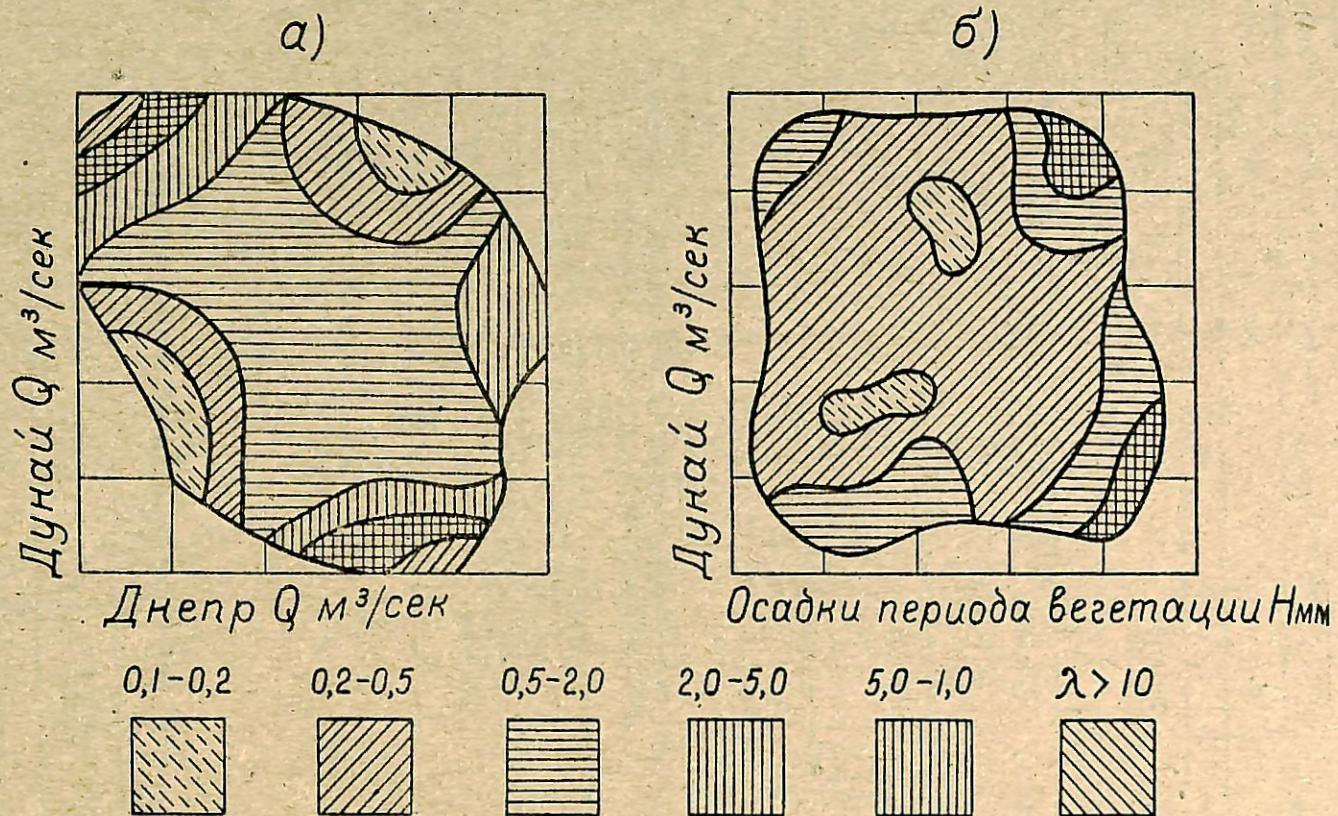


Рис. I. Коллигационные матрицы связи сопряженного годового стока рр. Днепра и Дуная (а) и годового стока Дуная и осадков периода вегетации (б).

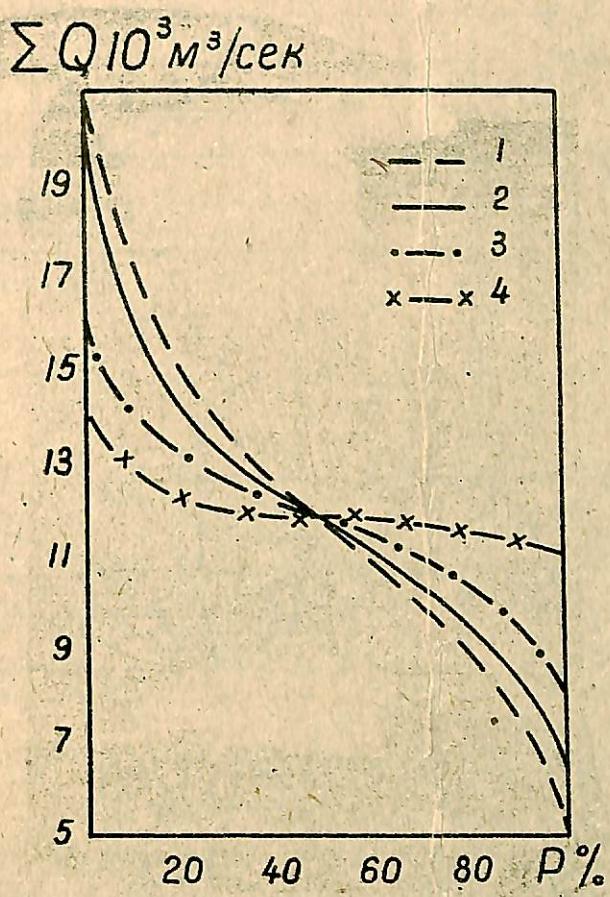


Рис.2. Графическое построение для анализа асинхронности весеннего стока рр.Дуная и Днепра.

- 1 - суммарный равнообеспеченный;
- 2 - суммарный хронологический;
- 3 - суммарный независимый;
- 4 - суммарный противоположно обеспеченный.

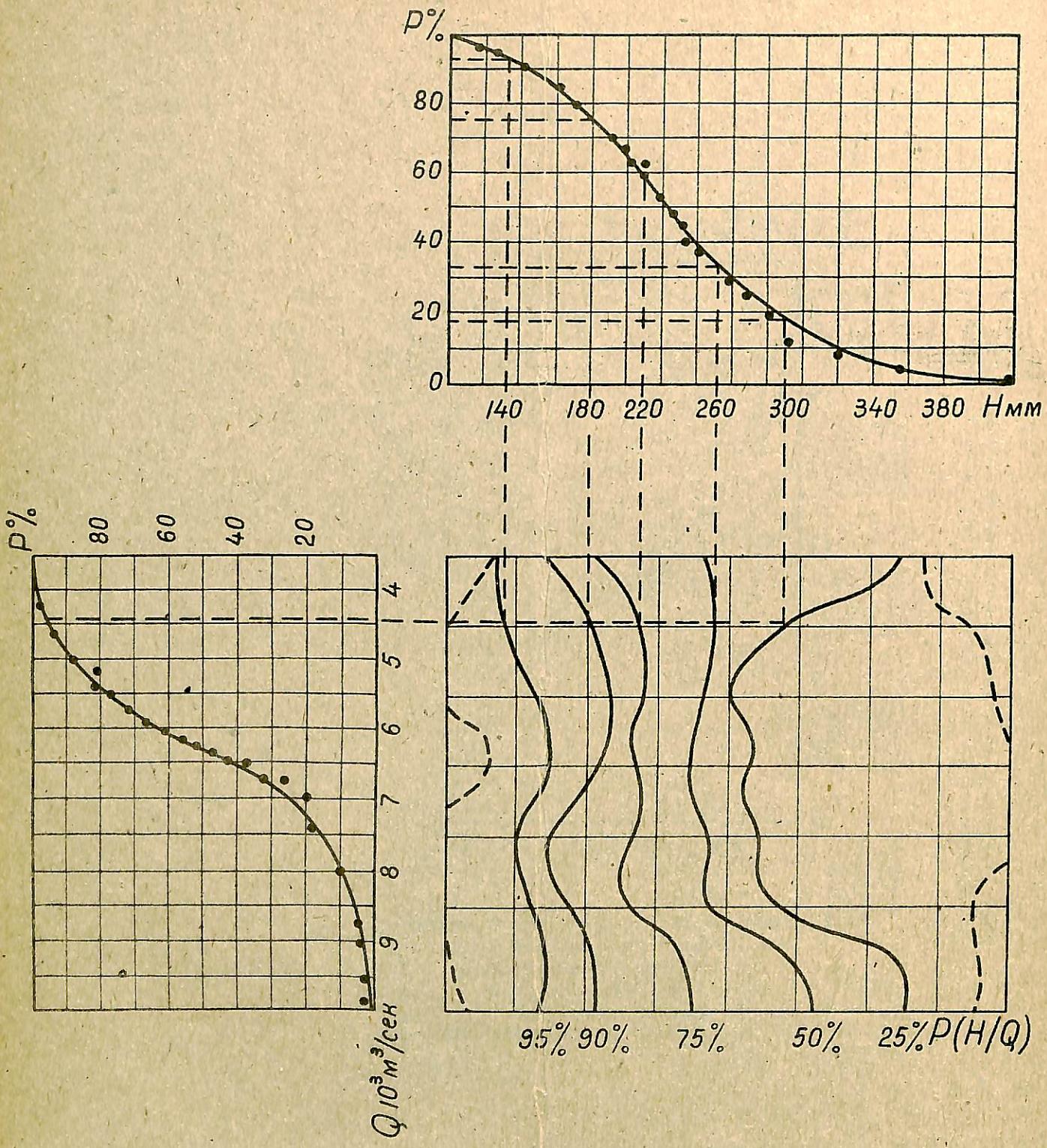


Рис.3. Матрица условных обеспеченностей осадков и годового стока
р. Дуная.

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАВОДОЧНЫХ ВОЛН НА ПОЙМЕННОЙ
ТЕРРИТОРИИ ПРИ СЛИЯНИИ РЕК МОРАВА И ДЫЕ.

С. ВАЛИШ, А. ПОЛИШЕНСКИ

Политехнический институт,
Брно, ЧССР

Р е з и м е

В месте слияния двух главных моравских рек - Морава и Дые имеется большая пойма, которая эффективно трансформирует расходы паводочных вод. Ввиду того, что паводки на обеих реках не всегда совпадают по времени, а боковая приточность бассейна не вся трансформируется поймой, бывает очень трудно предвидеть величину расхода на нижнем участке Моравы ниже впадения в нее реки Дые.

Авторы внесли свой вклад в решение этой проблемы тем, что с помощью механического аналогового вычислительного устройства они вычислили трансформацию разных паводков, наблюдавшихся на обоих водотоках в течение последних 30 лет, и составили вероятностный ряд расходов реки Моравы ниже слияния ее с Дыей. В результате получены графики, которые можно применять для прогнозирования паводочных расходов на нижнем участке Моравы.

S u m m a r y

The confluence of the two main Moravian rivers, the Morava and the Dyje, there is located in a large inundated area, which effectively transforms their flood waves. According to the irregularity in the time meeting of the two flood waves of both rivers, further to the irregularity of the transformation in the complicated inundation area and to the lateral inflow, it is very difficult to forecast the value of the discharge down the confluence, in the lower part of the river Morava. The authors contribute to the solving of this problem by the calculation of the flood discharges transformation by means of a mechanical analogue computer. They took in account the floods which were found in the period of the past thirty years in

both rivers and they arranged the flood probability curve for the lower part of the river, down the confluence. The graphic results are available for forecasting flood discharges in the lower part of the river Morava.

Z u s a m m e n f a s s u n g

An der Stelle des Zusammenflusses der beiden mährischen Flüsse - March und Thaya - ist ein großes Überschwemmungsgebiet vorhanden, das die Hochwasserabflüsse wirkungsvoll transformiert. In Anbetracht des Umstandes, daß die Hochwässer beider Flüsse nicht immer zeitlich zusammenfallen und der Seitenzufluß des Beckens vom Überschwemmungsgebiet nicht zur Gänze transformiert wird, kann die Größe des Abflusses im unteren Abschnitt der March unterhalb der Einmündung der Thaya nur sehr schwer vorausgesehen werden.

Die Verfasser haben zur Lösung dieser Frage dadurch beigetragen, daß sie unter Zuhilfenahme einer Analogrechenanlage die Transformation verschiedener Hochwasser, die an beiden Wasserläufen in den letzten 30 Jahren beobachtet wurden, berechnet und eine Wahrscheinlichkeitsreihe der Abflüsse der March unterhalb des Zusammenflusses mit der Thaya zusammengestellt haben. Als Ergebnis erhielt man Diagramme, die man für die Vorhersage von Hochwasserabflüssen im unteren Abschnitt der March verwenden kann.

— Паводочные волны на реках Мораве и Дые, проходя через общую обширную пойменную область, испытывают сильное трансформирующее воздействие поймы, отражающейся на их форме, максимальных расходах, продолжительности и даже объеме паводочного стока.

Характеристика реки Моравы

Водосборная площадь р.Моравы составляет 10691 км^2 , падение реки — 1127 м , длина — 271 км и средний уклон — $4,71 \%$. Средний многолетний годовой расход составляет $63,6 \text{ м}^3/\text{сек}$. Форма водосбора в верхней его части (до устья р.Бечвы) веерообразная, в средней части, т.е. от устья р.Бечвы до устья р.Дые — продолговатая.

Среднее течение реки частично зарегулировано, но на участке выше впадения р.Дые, длиной около 60 км , русло Моравы находится почти в естественном состоянии; его пропускная способность очень мала и составляет примерно $150\text{--}400 \text{ м}^3/\text{сек}$. На этом участке, имеющем малые уклоны, паводочные волны выходят на пойму и затопляют ее. На рис. I пойма показана штриховкой. Последний гидрометрический створ на Мораве, до слияния ее с Дьей, расположен на зарегулированном участке — у п.Стражнице.

Характеристика реки Дые

Площадь водосбора р.Дые составляет 13419 км^2 , падение — 528 м , длина — 287 км , средний уклон — $1,84 \%$. Средний многолетний годовой расход — $44,1 \text{ м}^3/\text{сек}$. Форма бассейна — веерообразная, что с точки зрения формирования паводков наиболее опасно.

Русло р.Дые и ее притоков находится большей частью в естественном состоянии, прежде всего на нижнем участке. Пропускная способность русла р.Дые и ее притоков невелика и на некоторых участках составляет только $60\text{--}120 \text{ м}^3/\text{сек}$, поэтому паводочные воды на всем участке р.Дые от впадения притока р.Свратка до слияния с р.Моравой ежегодно вы-

ходят на пойму и затопляют ее. Гидрометрический створ в пункте Долни Вестонице расположен на пойменном участке (рис. I).

Повторяемость паводков

При расчете повторяемости паводков и оценке трансформационного влияния поймы авторы использовали данные за 1936—1965 гг. На обеих реках наблюдения за паводками велись и до 1936 г., но в двадцатых и тридцатых годах проводились регулировочные работы на главном притоке р.Морава-р.Бечва и в среднем течении р.Моравы. На р.Дые была построена водохранилищная плотина Вранов. Все указанные работы, нарушившие естественный водный режим, были закончены до 1936 г., так что по условиям руслового стока период с 1936 г. можно считать за однородный.

Под вероятной повторяемостью паводков подразумевается, с одной стороны, повторяемость максимальных расходов и, с другой стороны, повторяемость объемов паводочной волны. Максимальные расходы различной повторяемости на обеих реках до их слияния и рассчитанные максимальные расходы р.Моравы различной повторяемости в пункте Моравский Ян (ниже слияния) приведены в табл. I.

Таблица I
Значения максимальных расходов ($\text{м}^3/\text{сек}$)
разной повторяемости за период 1936—1965 гг.

Река, пункт	Повторяемость I раз в n лет					
	I	5	10	20	50	100
Морава-Стражнице	410	560	620	659	700	725
Дые-Долни Вестонице	175	390	510	650	810	940
Морава-Моравский Ян	440	840	1020	1200	1440	1610

Объем паводочной волны подсчитывался как сумма расходов за период, начало и конец которого опре-

делялись моментом достижения среднего многолетнего расхода. Рассчитанные значения повторяемости объемов приводятся в табл.2.

Таблица 2

Значения объемов паводочного стока разной повторяемости (млн.м³) за период 1936-1965 гг.

Река, пункт	Повторяемость I раз в N лет							
	1	2	5	10	20	50	100	1000
Морава- Стражнице	245	400	670	900	1150	1500	1730	2570
Дне-Долни Вестонице	200	380	720	1040	1340	1780	2130	3260

Одновременность паводочных волн и время их продвижения

Одновременное прохождение паводочных волн на Мораве и Дне наблюдается весьма нерегулярно. В то время как на р.Дне преобладают зимние паводки, на р.Морава чаще имеют место паводки летние. Максимальный за рассматриваемый период паводок был образован почти полным совпадением во времени максимальных расходов отдельных водотоков, которое произошло в марте 1941 г. Часть гидрографа этого паводка приводится на рис.2, где изображены трансформированные гидрографы обеих рек и суммарный гидрограф ниже их слияния (у п.Моравский Ян).

Время пробега паводочной волны на обеих реках через их нижние участки показано на рис. 3 и 4. Сплошной линией обозначены средние значения времени пробега, пунктирные ограничивают дисперсию данных наблюдений.

Определение расходов ниже слияния обеих рек

- Необходимо было решить два главных вопроса:
- определить расчетом величину паводочных расходов ниже слияния обеих рек, чтобы дополнить ряд наблюдений в пункте Моравский Ян с целью составить для этого пункта ряд максимальных расходов для определения вероятности их повторения;
 - на основании наблюденных паводочных расходов обеих рек разработать метод прогноза расходов паводка р.Моравы ниже впадения в нее р.Дне.

Был избран следующий прием расчета: рассчитывается трансформация отдельных гидрографов, наблюденных у пунктов Долни Вестонице и Стражнице, после чего трансформированные гидрографы суммируются и к их сумме прибавляются еще расходы притока с промежуточной площади водосбора. При расчете трансформации объемы поймы обеих рек были определены по поперечным профилям, измеренным на месте. Зависимость объемов поймы от расходов в реке показана на рис.5.

Для расчета трансформации учитывалось статичес-

кое затопление, потому что учет динамического затопления в данных условиях невозможен. Ошибкой, которая из-за этого упрощения возникает, можно пренебречь, полагая что она не превышает точность исходных данных. Вычисления были произведены на аналоговой вычислительной машине собственной конструкции.

Описание аналоговой вычислительной машины

Вычислительная машина сконструирована по принципу механической аналогии. Основные вычислительные действия производятся при помощи валов и зубчатых передач. Количество оборотов вала прямо пропорционально значению определенной функции, угловая скорость вращения вала моделирует производную функции. Зубчатая передача служит как множитель или делитель функции на постоянное число. Дифференциалы проводят непрерывное суммирование. Функциональные механизмы служат как интегральные единицы, которые осуществляют непрерывное интегрирование функции по ее аргументу или непрерывное умножение двух функций. Исходное значение функции, также как и результат расчета на выходном устройстве изображаются в графическом виде на бумаге, которая прикрепляется ко входному и выходному цилиндрам. Расчет трансформации паводочной волны при статическом затоплении сводится к решению дифференциального уравнения

$$\Phi_1(t)dt - \Phi_2(t)dt = dV, \quad (1)$$

где $\Phi_1(t)$ - приток воды к пойме, зависящий от времени;

$\Phi_2(t)$ - отток воды из поймы, зависящий от времени;

dV - изменение объема поймы за время .

Уравнение (1) приведено к окончательному виду (6) следующим способом. Функция , обозначающую объем оттока воды, можно определить как функцию высоты уровня воды

$$\Phi_2(t) = \Phi_2[f_1(h)], \quad (2)$$

где h - высота уровня воды.

Так как объем поймы является функцией высоты уровня воды

$$V = f_2(h), \quad (3)$$

где V - объем поймы, то можно написать инверсионную функцию

$$h = f_3(V), \quad (4)$$

которую подставим в выражение (2). Таким образом получим выражение зависимости объема оттока от объема поймы:

$$\Phi_2(t) = \Phi_2\{f_1[f_3(V)]\} = \Phi_3(V). \quad (5)$$

Эта зависимость для обеих пойменных областей рек Морава и Дие изображена графически на рис.5. Уравнение (1) после подстановки в него уравнения (5) будет иметь вид:

$$\Phi_4(t)dt - \Phi_3(V)dt = dV. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение (6) можно решить на анализаторе сравнительно простой конструкции, блок-схема которой показана на рис.6. Основные вычисления осуществляются в основной цепи, которая обозначена на схеме. Основная цепь состоит из счетчика времени, интегратора, дифференциала, двух вращающихся цилиндров для записи значений функций, одного цилиндра для записи получаемых результатов и нескольких множителей. В систему подключено еще несколько цепей, из них некоторые являются вспомогательными, другие служат для контроля прибора. В счетчиках I и 2 в любой момент расчета можно определить промежуточные результаты.

Расходы после трансформации в пойменной области

Результаты расчета трансформации на аналоговой вычислительной машине приводятся в качестве примера на рис.2. Как видим, трансформированные расходы обеих рек сдвинуты на соответствующее время пробега и увеличены на величину притока с промежуточного водосборного бассейна и затем просуммированы в единый гидрограф. Таким образом получаем окончательные расходы в пункте Моравский Ян.

Определение дополнительного притока с промежуточной территорией бассейна весьма серьезная проблема. Авторы попытались использовать связь величины этого притока с расходом главного водотока. Но материалы, которые были в их распоряжении, оказались для этих целей недостаточными, так что приток с промежуточной части водосбора для расходов разной повторяемости нельзя было вычислить. Поэтому авторы приняли величину дополнительного притока постоянной для всех расходов, на р.Дие равной 7 % и на р.Морава (выше слияния с р.Дие) равной 8 % максимального расхода.

Таким образом была рассчитана вероятность повторения максимальных расходов в пункте Моравский Ян. Результаты этого расчета приведены в табл. I.

Прогноз максимальных расходов

Прогноз паводочных максимальных расходов в сложных условиях стока на участке слияния рр.Морава и Дие не простая проблема. По рассчитанным и изменившимся величинам в трех гидрометрических створах была составлена зависимость, показанная на рис.7. С помощью этого графика можно в пределах требуемой точности определить максимальный расход паводочной

волны ниже слияния обеих рек. Этот прогноз имеет практическое значение, потому что известно время продвижения паводков разной повторяемости в пойме.

Л и т е р а т у р а

1. Чермак М. Гидрологический очерк р.Дие. Брюно, 1952.
2. Даребник З., Валиш С. Расчет трансформации паводка в водохранилище на механической вычислительной машине. Водное хозяйство, № 4, 1960.
3. Попишенски А., Сахерова Д. Режим стока в области слияния р.Морава и Дие в южной Моравии. Сборник трудов Гидрометеорологического института, Прага, том 15, 1969.
4. Валиш С. Механическая счетная машина для расчета уравнительных резервуаров. Водохозяйственный журнал, № 1, 1961.
5. Валиш С. Расчет трансформирования паводочных волн в водохранилище Вир на аналоговой вычислительной машине. Рукопись, Брюно, 1969.

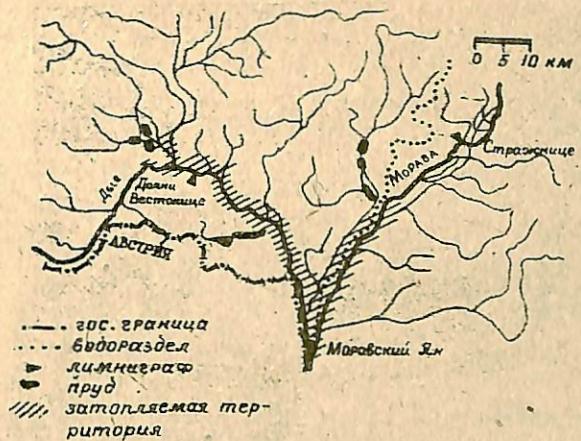


Рис.1. Схематическая карта области слияния рек Морава и Дне.

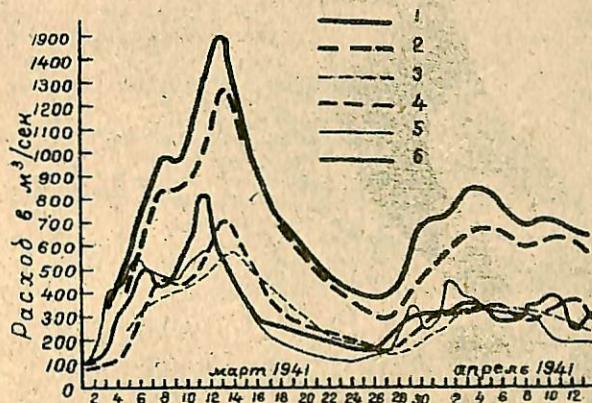


Рис.2. Гидрографы паводка (март 1941 г.).

- 1 - наблюденный гидрограф в п. Моравский Ян;
- 2 - сумма трансформированных расходов воды в п. Долни Вестонице и Стражнице;
- 3 - трансформированный гидрограф в п. Стражнице;
- 4 - трансформированный гидрограф в п. Долни Вестонице;
- 5 - наблюденный гидрограф в п. Стражнице;
- 6 - наблюденный гидрограф в п. Долни Вестонице.

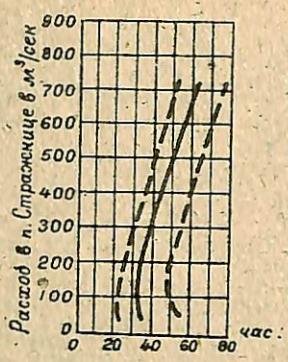


Рис.3. Зависимость времени пробега паводочной волны на р.Морава на участке Стражнице—Моравский Ян от расхода воды в Стражнице.

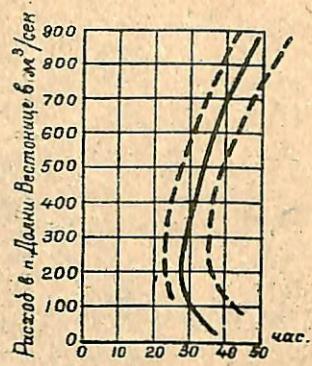


Рис.4. Зависимость времени пробега паводочной волны на р.Дyе на участке Долни Вестонице—устье р.Дyе от расхода воды в Долни Вестонице.

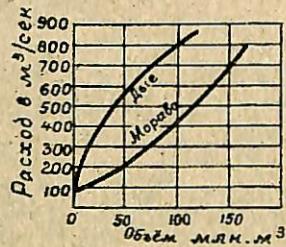
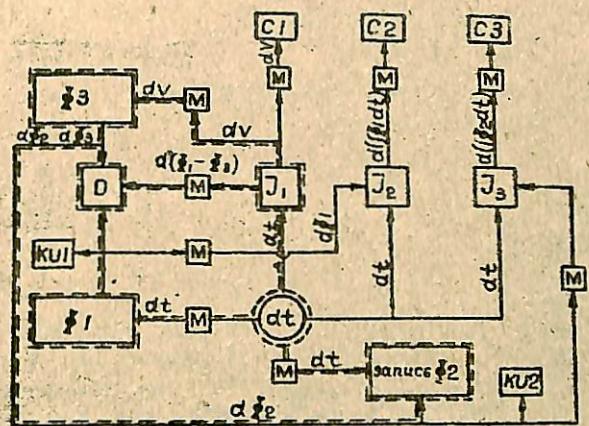


Рис.5. Объем пойм на рр.Морава и Дyе.



— основная цепь;

— дополнительные и контрольные цепи;

J — интегратор;

dt — счетчик времени;

M — множитель;

D — дифференциал;

F — запись функции;

KU — контрольный указатель;

C — счетчик.

Рис.6. Блок-схема механической аналоговой вычислительной машины для расчета трансформации падающей волны.

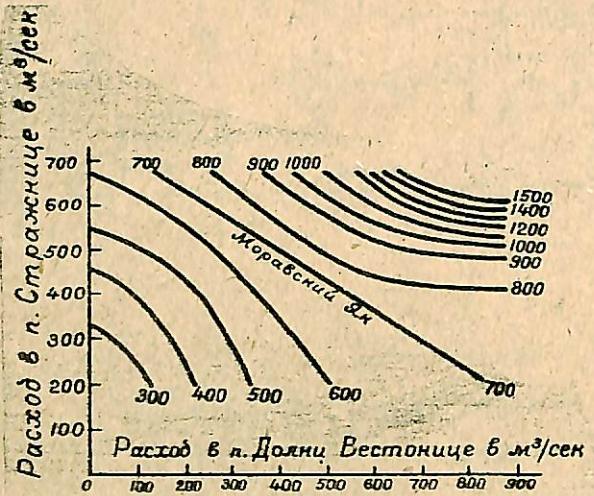


Рис. 7. Соотношение между максимальными расходами воды в пунктах Моравский Ян, Стражнице и Долни Вестонице.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА БАССЕЙНОВ-ИНДИКАТОРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА МЕСЯЧНОГО СНЕГО-ДОЖДЕВОГО СТОКА Р.ДУНАЙ

М.И.ГУРЕВИЧ

Государственный гидрологический институт,
Ленинград, СССР

Резюме

Сток с большого бассейна предсказывается по суммарному притоку в речную систему, подсчитываемому по стоку с бассейнов-индикаторов. В условиях заблаговременности используется неполная информация о стоке с бассейнов-индикаторов, по которой предсказывается полная величина притока. По интенсивности развития фазы режима учитывается также русловое регулирование. Метод проверен в оперативных условиях прогноза стока р.Днепра (239000 км^2) на 3 декады вперед.

Для применения метода к бассейну р.Дунай следует:
а) выбрать расчетный интервал времени; б) определить карту изохрон руслового добегания; в) определить оптимальные размеры стокооднородных площадей; г) выбрать с помощью ЭВМ оптимальное сочетание бассейнов-индикаторов и расчленить бассейн на стокооднородные части.

Zusammenfassung

Der Abfluß aus einem großen Einzugsgebiet wird nach dem nach der Methode der Indikatorflüßgebiete berechneten summarischen Zufluß in das Flüßsystem vorhergesagt. Ist es beiziehen notwendig Angaben zu erhalten, wird eine unvollständige Information über den Abfluß aus den Indikatorflüßgebieten ausgenutzt, nach der eine volle Größe des Zuflusses vorhergesagt wird. Nach der Intensivität der Entwicklung der Regimephase wird auch die Flüßbettregelung berechnet.

Die Methode ist in operativen Verhältnissen der Prognose des Abflusses des Dnepras (239000 km^2) für 3 Dekaden im voraus geprüft worden.

Bei der Anwendung der Methode für das Einzugsgebiet der Donau ist vorher eine Vorarbeit auszuführen
а) die Auswahl eines Berechnungsintervalls der Zeit;
б) die Aufzeichnung einer Karte der Isochronen;
в) die Bestimmung optimaler Größen für Flächen mit gleichartigem Abfluß; д) die Auswahl mit Hilfe von ERM optimaler Vereinigung der Indikatorflüßgebiete und die Zerliederung des Flüßgebiets dem Abflusse nach in gleichartige Flächen.

I. Определение суммарного притока методом бассейнов-индикаторов

Метод бассейнов-индикаторов, предложенный в 1947 г. А.В.Огиевским [7] для сравнительно устойчивых условий снеготаяния, переработан автором [3, 4, 5, 6], применительно к условиям формирования дождевого стока.

Наиболее существенно изменено условие стоковойrepräsentativnosti. Пришлось отказаться от определения тесной связи характеристик стока с большого и с малого бассейнов, ввести понятие о стокооднородных частях. В бассейне F , в пределах которых относительные величины стока могут считаться постоянными. Для равнинного бассейна р.Днепра размеры стокооднородных частей определены равными: для суточного интервала стока $\theta < 2000 \text{ км}^2$ и для декадного интервала $\theta < 8000 \text{ км}^2$ [6].

Сток с каждой из n стокооднородных частей бассейна принимается в качестве притока и за i -й интервал составит

$$Y_{n,i} = K_\theta Y_{f,i} \quad \text{м}^3/\text{сек}, \quad (1)$$

где Y_f — сток с бассейна-индикатора, площадью f , расположенного внутри стокооднородной площади, а $K_\theta = \frac{\theta}{f}$.

Для всего большого бассейна площадью $F \text{ км}^2$ суммарный приток, формирующий сток за i -й интервал, подсчитывается с учетом добегания τ за интервал $i-\tau$ для каждой стокооднородной площади. Названный поэтому равновременным, он составляет величину

$$\sum Y_{f,i-\tau} = Y_{1,i-\tau} + Y_{2,i-\tau} + \dots + Y_{n,i-\tau} \quad \text{м}^3/\text{сек} \quad (2)$$

При этом единица времени определяемого добегания (например I сутки) должна быть меньше единицы времени подсчета стока (декады, пентады).

2. Трансформация притока в сток

Сток за интервал $i+1$ можно рассматривать как сумму

$$Y_{i+1} = K_{pp} \sum Y_{i-\tau+1} + Y_{gpp} + \Delta Y_{pp} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (3)$$

где K_{pp} — коэффициент, характеризующий потери воды на смачивание почво-грунтов, слагающих берега и на последующее испарение (речевые потери), Y_{gpp} — глубокое грунтовое питание в руслах рек, ниже створов на малых реках и ΔY_{pp} — уменьшение стока на подъеме и увеличение — на спаде, под влиянием речевого регулирования. Это влияние определяется зависимостью

$$\Delta Y_{pp} = f(\Phi), \quad (4)$$

где Φ — характеристика фазы режима по разностям $\Delta Y = \sum Y_{i-\tau+1} - \sum Y_{i-\tau}$ или $Y_j - \sum Y_{j-\tau+1}$ (Y_j — сток в конце i -го интервала). Зависимости (4) устойчивы при постоянстве фазы режима и нарушаются лишь в кратковременные периоды формирования максимума, когда фазы притока и стока не совпадают. Зависимости (4) могут обладать различной формой, как например:

$$\Delta Y_{pp} = C_2 \Delta \sum Y \quad (5)$$

$$\Delta Y_{pp} = C_2 (Y_j - \sum Y_{j-\tau+1}) \quad (6)$$

$$\Delta Y_{pp} = C_3 (Y_j - \sum Y_{j-\tau+1}) + Y_{gpp} \text{ м}^3/\text{сек}. \quad (7)$$

Возможны и другие линейные или нелинейные варианты.

Величина $Y_{gpp} \approx \text{const}$ и определяется по разности

$$Y_{gpp} = Y_{min} - \sum Y_{min} \quad (8),$$

где Y_{min} — предельный минимум стока со всего бассейна, формирующийся главным образом подземным питанием и определяемый согласно методу, предложенному автором [2] и близкий к наблюденно-му минимуму, а $\sum Y_{min}$ — сумма предельных минимумов стока всех малых рек бассейна, определяемая равенствами (1) и (2), причем в равенстве (1) Y_j заменяется величиной Y_{min} по данным о стоке с бассейнов-индикаторов.

Соответственно форме зависимостей (4), различаются также и равенства, используемые для вычисления и прогноза стока большой реки по стоку с малых бассейнов. Таковы, например, равенства:

$$Y_{i+1} = C_1 \sum Y_{i-\tau+1} + (1-C_1) \sum Y_{i-\tau+1} + Y_{gpp} \text{ м}^3/\text{сек} \quad (9), \text{ или}$$

$$Y_{i+1} = C_2 Y_j + (1-C_2) \sum Y_{i-\tau+1} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (10)$$

полученные объединением равенства (3), если принять, что $Y_{pp} = 0$, с равенствами (5) и (6). Таково также равенство

$$Y_{i+1} = C_3 Y_j + (K_{pp} - C_3) \sum Y_{i-\tau+1} + Y_{gpp} \text{ м}^3/\text{сек} \quad (II),$$

полученное объединением равенств (3) и (6). Воз-

можны и другие варианты расчетной зависимости.

3. Прогноз стока большой реки по стоку с бассейнов-индикаторов

При составлении прогноза в последний j -й день i -го интервала (пентады или декады) на следующий $i+1$ -й интервал, сток в замыкающем створе Y_j и данные о стоке с бассейнов-индикаторов за i -й интервал поступают по информации со всей территории бассейна. Тогда по равенствам (I) и (2), может быть определена полная величина суммарного разновременного притока $\sum Y_{i-\tau}$. За интервал $i+1$ такие данные могут быть получены только по той части бассейна, где $T > t_3$ (t_3 — время заблаговременности). Получающийся в результате подсчета по (I) и (2) неполный приток $\sum Y_{i-\tau+1, \Phi}$ используется в качестве аргумента для прогноза полной его величины:

$$\sum Y_{i-\tau+1} = f(\sum Y_{i-\tau+1, \Phi}) \quad (12)$$

Другим аргументом его прогноза служит качественная характеристика фазы режима. Зависимость построенная отдельно для фаз подъема и спада, как показано Н.Н.Осадчей [8,7] (рис. I) дает наилучшие результаты.

Одновременный прогноз на ряд интервалов выполняется также по зависимости вида (9), (10) или (II). Однако для $i+2$ -го интервала заменяется величиной стока $Y_{j+\tau}$ в конце интервала $i+1$, где T — число дней интервала. Эта величина предсказывается по равенству

$$Y_{j+\tau} = [K_1 (\sum Y_{j-\tau+1} - Y_j) + 1] Y_j \text{ м}^3/\text{сек}. \quad (13)$$

$$\text{Тогда } Y_{i+2} = C_2 Y_{j+\tau} + (1-C_2) \sum Y_{i-\tau+2} \quad (10-a).$$

Здесь $\sum Y_{i-\tau+2} = f(\sum Y_{i-\tau+2, \Phi})$, если только такая зависимость окажется достаточно тесной. Аналогичным образом возможен прогноз на ряд последующих интервалов, пока накапливающиеся погрешности не окажутся неприемлемыми.

Проверка [8,7] показала, что для равнинных рек прогноз дождевого стока изложенным методом дает удовлетворительные результаты: для бассейнов площадью 100 000 км² — на 3 декады, для бассейнов от 50 000 до 100 000 км² — на 2 декады и для бассейнов 20 000–50 000 км² — на 1 декаду.

4. Условия применения рассматриваемого метода и прогнозу стока в бассейне р.Дунай

Применение рассматриваемого метода к прогнозу стока р.Дунай представляется возможным, при условии предварительного решения следующих основных задач.

Первой является задача о предельных размерах стокобондродных частей бассейна. Как пока-

зано выше, для равнинного бассейна р.Днепра эти размеры составляют для суточного стока $2\ 000 \text{ км}^2$, а для декадного – $8\ 000 \text{ км}^2$. Они определены посредством построения связей стока с малых бассейнов, или связей слоя осадков за расчетный интервал времени, геометрические центры, или пункты наблюдений которых расположены на различных расстояниях. Наибольшие расстояния, при которых такие связи оказываются достаточно тесными составляют радиус круга, площадь которого может быть условно принята в качестве стокооднородной.

Для бассейна р.Дуная, имеющего в значительной мере горный характер, детальность расчленения пока представляется неясной. При декадном интервале и средних размерах стокооднородных частей бассейна $\Theta = 8\ 000 \text{ км}^2$ бассейн Дуная до Оршавы понадобится расчленить на 72 части, а при $\Theta = 5\ 000 \text{ км}^2$ – на 115 частей. Возможно однако, что при практическом решении вопроса о расчленении бассейна с помощью ЭВМ, окажется возможным пойти на увеличение размеров стокооднородных частей.

Второй важной задачей является выбор бассейнов-индикаторов. Их число не должно превышать числа стокооднородных частей бассейна, хотя может быть и меньше его. Как показал просмотр ежегодников ряда Дунайских стран за 1962 г., в бассейне Дуная до Оршавы расположено около 600 пунктов наблюдений за уровнями, или также за расходами воды на бассейнах рек от 100 до $1\ 000 \text{ км}^2$. Таким образом в среднем для этого бассейна один малый бассейн приходится приблизительно на $1\ 000 \text{ км}^2$. Столь детальное расчленение бассейна вряд ли окажется необходимым даже при прогнозе суточного стока. Поэтому детальная изученность бассейна лишь облегчает выбор оптимального сочетания бассейнов-индикаторов. Такой выбор представляется возможным с помощью ЭВМ, путем решения ряда эмпирических уравнений регрессии. Для решения указанных уравнений понадобится определение рядов величин $Y_{t,i} = K_i Y_{t,i}$ для каждой стокооднородной площади, при данном варианте расчленения бассейна. Большое число таких вариантов из-за значительности размеров и сложности физико-географических условий бассейна Дуная трудно определить. Поэтому сначала целесобразно решать уравнения вида

$$Y_i = K_{2,1} Y_{t,1} + K_{2,2} Y_{t,2} + \dots + K_{2,n} Y_{t,n} \quad (14)$$

Таким образом, сначала предусматривается условное расчленение бассейна на равновеликие стокооднородные части. Это условие неудовлетворительно, но дает возможность решения большого числа вариантов уравнения (14). Несколько лучших из них вариантов, затем, должно быть выделено и по ним выполнено расчленение бассейна на стокооднородные части, с учетом физико-географичес-

ких условий. Тогда можно решать уравнения вида

$$Y_i = K_{2,1} K_{\theta,1} Y_{t,1} + K_{2,2} K_{\theta,2} Y_{t,2} + \dots + K_{2,n} K_{\theta,n} Y_{t,n} \quad (15)$$

в результате чего и будет отобран наилучший вариант. Для вычислений равенствами (14) и (15) понадобятся ряды синхронных величин стока с бассейнов-индикаторов, число членов которых должно в несколько раз превышать число членов уравнения. Если бассейн расчленять даже на 100 частей, то, при декадной единице времени, синхронные наблюдения над стоком с бассейнов-индикаторов за 10 лет дадут ряды из 360 членов. При пятидневной единице времени такое же число членов ряда обеспечат наблюдения только за 5 лет. Можно также выделить ряд величин специально для проверочных расчетов, что существенно повысит надежность решения.

Третьей важной задачей является определение схемы добегания. Могут быть использованы существующие схемы, как например схема Афанасьева А.И. [1], или определена новая схема.

Решение перечисленных задач позволит начать расчеты по определению равенствами (1) и (2) величин суммарного притока ΣY . Далее должна быть проанализирована зависимость $Y_i = f(\Sigma Y_{i-t})$, избран оптимальный вариант расчетной зависимости, как например, (9), (10) или (II), и определены значения глубокого грунтового питания и величина коэффициента C .

Для составления прогноза стока на I предстоящий интервал времени, например, на декаду, необходимо также определить зависимость (12), а, следовательно, задаться некоторой заблаговременностью прогноза.

При прогнозе на ряд предстоящих интервалов окажется необходимым хотя бы приближенно определить число интервалов, прогноз на которые предполагается возможным. Иными словами следует приблизительно определить наибольшую возможную заблаговременность прогноза. Приближенные суждения об этом можно сделать путем оценки соотношения между всей площадью бассейна и той ее частью, где $T > t_3$, и с которой поэтому может быть получена информация о фактическом стоке с бассейнов-индикаторов. Так, на схеме изохрон руслового добегания в бассейне р.Дунай, составленной в 1957 г. Афанасьевым А.И. [1], можно приблизительно выделить части бассейна, которые от всей его площади составляют: 1) $T < 5$ суток – 6%, 2) $T > 5$ суток – 94%, 3) $T < 15$ суток – 3% и 4) $T < 20$ суток – 6% (рис.2). Следовательно, при прогнозе декадного стока Дуная у Оршавы с заблаговременностью $t_3 = 0$ (прогноз составляется в конце месяца на первую декаду следующего месяца) может быть использована информация о стоке бассейнов-индикаторов с 94% всей площади бассейна. Прогноз в таких условиях очевидно вполне надежен.

При одновременном прогнозе на вторую декаду месяца $t_3 = 1$, будет использоваться информация уже только с 39 % всей площади. Однако, как видно по рис.2 эта информация поступает из всех основных стокообразующих районов: с верховьев самого Дуная, а также его притоков: Инна, Моравы (северной), Савы и Тиссы. Это позволяет предполагать и такой прогноз также надежным. Наконец, при $t_5 = 2$, т.е. при одновременном прогнозе на третью декаду месяца, может быть использована неполная информация и притом всего только с 6 % площади бассейна, где $T > 20$ суток. Правда эта информация будет поступать с верховьев как Дуная, так и Тиссы, т.е. с противоположных окраин бассейна. Поэтому, хотя сомнительным результатом, попытку такого прогноза предпринять все же следует.

Поскольку надежный прогноз на первые две декады по-видимому обеспечен, то можно полагать, что и на месяц в целом прогноз окажется также надежным. Такой вывод, следовательно, совпадает с результатом исследования Афанасьева А.И. [1]. Однако, предлагаемый метод обладает преимуществом состоящим в возможности подекадного или попентадного расчленения предсказываемой величины, а также в возможности использования информации о стоке бассейнов-индикаторов для прогноза стока с частей бассейна. Так, по-видимому, надежным следует предполагать прогноз стока Дуная у г.Вены на декаду вперед, поскольку здесь можно получить информацию почти с половины бассейна; то же и для р.Дуная у г.Будапешта, где информация может быть получена с 60 % площади бассейна. Наконец, также надежным следует предполагать прогноз стока р.Савы у г.Белграда, где информацию можно получить с 66 % площади бассейна.

Л и т е р а т у р а

1. Афанасьев А.И. Метод прогноза стока Дуная по запасам воды в русловой сети. Труды ЦИИШ, вып.59, 1957.
2. Гуревич М.И. Прогнозы летнего и осеннего стока равнинных рек на основе его зависимости от осадков. Труды ГГИ, вып.53, 1956.
3. Гуревич М.И. Глубокое подземное питание и водообмен между рекой и руслом. Труды ГГИ, вып.133, 1966.
4. Гуревич М.И. Вычисление декадного стока рек средних и больших размеров по стоку малых рек. Труды ГГИ, вып.138, 1967.
5. Гуревич М.И. Вычисление стока больших и средних рек по стоку малых рек. Международный симпозиум по паводкам и их расчетам. Ленинград, 1967.
6. Гуревич М.И. Вычисление и прогноз летне-осеннего стока с больших равнинных бассейнов по стоку малых рек. Труды ГГИ, вып.153, 1968.
7. Огиевский А.В. Бассейны-индикаторы. Труды НИУ ГМС, сер.ГУ, вып.26, 1947.
8. Осадчая Н.Н. Уточнение метода вычисления и прогноза дождевого стока больших и средних рек по стоку с малых бассейнов. Труды ГГИ, вып.179, 1970.

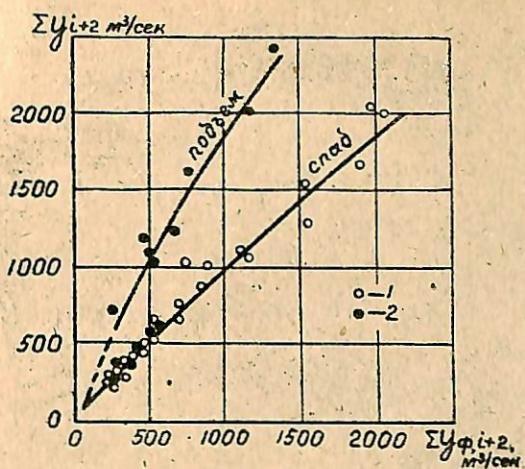


Рис.1. Зависимость полного декадного дождевого притока в водохранилище Киевской ГЭС от неполной его величины, определяемой по неполной информации, при прогнозе на вторую декаду месяца, с заблаговременностью $t_3 = 1$.

I - величина притока на спаде и 2 - на подъеме.

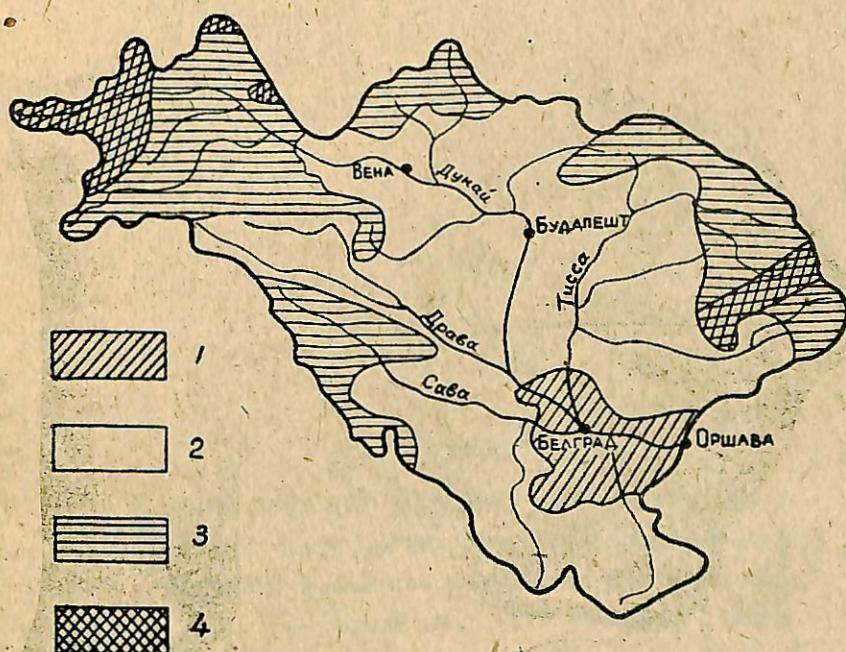


Рис.2. Расчленение бассейна р.Дуная до г.Оршавы на части с добеганием:
1 - $\tau \leq 5$ сут.; 2 - $5 < \tau \leq 15$ сут.; 3 - $15 < \tau \leq 20$ сут.;
4 - $\tau > 20$ сут.

К печати 18.XII.72 г. Зак. 198 Тираж 150 экз.
Киевская книжная типография научной книги Республика
ликанского производственного об"единения "Полиграф-
книга" Госкомиздат УССР. Киев, Репина, 4.

