PN-ACB-085
94736

Environmental Policy and Technology Project

Contract No. CCN-0003-Q-00-3165

NEW INDEPENDENT STATES

FINAL PROJECT REPORT SUMMARY

Short-Term Forecasting of the Amu Darya's Flow, Based on a "Reservoir" Model
Applied Demonstration Project No. 2

By Sergey Myagkov
October 1996
Delivery Order 08, Task B

Prepared for:
Central Asia Mission
U.S. Agency for International Development

Prepared by:
Central Asia Regional EPT Office in Almaty, Kazakhstan
Environmental Policy and Technology Project
For the New Independent States of the Former Soviet Union
A USAID Project Consortium Led by CH2M HILL

1

ENVIRONMENTAL POLICY AND TECHNOLOGY PROJECT

Central Asian Republics Regional Office

ПРОЕКТ ПО ПРИРОДООХРАННОЙ ПОЛИТИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ

Региональный офис республик Средней Азии

ENVIRONMENTAL POLICY AND TECHNOLOGY PROJECT

A Project Financed by the U.S. Agency for International Development

Проект финансируемый Агентством по Международному Развитию США

Serving Countries of the Former Soviet Union

Служит странам бывшего Советского Союза

Managed by CH2M HILL

Под руководством CH2M HILL

This report was completed as part of Task B of Delivery Order 8.

This report has been reviewed for content and approved for distribution to USAID.

Barbara Britton — 4/7/97

EPT Project Manager — Date

Syed I. Mahmud — 4/15/97

EPT Regional Director — Date

This report has been reviewed for content and approved for distribution.

Barbara Britton — 4/7/97

EPT Project Manager — Date

Syed I. Mahmud — 4/15/97

EPT Regional Director — Date

USAID

Ulitsa Abai 4, Suite 112, Almaty 480024, Kazakstan, Telephone: (7-3272) 65-46-95, Fax: (7-3272) 64-68-49

Казахстан, 480024, Алматы, ул.Абай 4, комн.112, Тел.: (7-3272) 65-46-95, Факс: (7-3272) 64-68-49

Printed on Recycled Paper

This is the English translation of the summary from an applied demonstration project report. The original full-length report is in Russian and follows the English report.

Acknowledgments

The authors would like to express their appreciation to the Environmental Technology and Policy Project specialists for their devoted attention and efficient solution of arising technical problems. The authors are thankful to the employees of the Hydrometeorology Service of Turkmenistan and Uzbekistan, the Ministry of Water Management of Turkmenistan, and the "Amu Darya" Basin Water Organization (BWO) for their assistance with the project.

About the Authors

Dr. S.V. Myagkov - project supervisor, head of SANIGMI Hydrology Forecasting Laboratory.

V.N. Kuprovskiy - researcher, head of Hydrology Department of Turkmenistan, Hydrometeorology Service

Dr. E.D. Kalandarov - researcher, director of "Amu Darya" BWO

A.V. Kasianov - researcher, engineer, software development

L.A. Shayakhova - researcher, computer operator

V.A. Novikova - researcher, computer operator

Materials and Reports

During the course of the project the following materials have been published and presented at seminars:

"Mathematics Modeling and Modern Methods of Hydrological Calculation and Forecasting" Yu.M. Denisov, S.V. Myagkov, SANIGMI

"River and Computer," S.V. Myagkov, "Pravda Vostoka," Tashkent, March 22, 1996

"A Look at the Desert From Space," S.V. Myagkov, "Pravda Vostoka," Tashkent, June 18, 1996

"The Mysterious Amu Darya," S.V. Myagkov, "Pravda Vostoka," Tashkent,July 30, 1996

"The Problems of Water Storage in the Desert," S.V. Myagkov, L. Shayahova, at the FRIEND seminar, WMO Publ.

"A Model for the Forecast of Drainage Water," S.V. Myagkov, at the 3rd USA/CIS Hydrological Seminar, Tashkent, Sept. 1996

Project Summary

Purpose and Scope of Project

The purpose of this project was to develop a computer modelling program to provide short-term forecasts of flood movement in the Amu Darya River. At present the Aral Sea problem is typical of the problems facing the planet, especially in the Central Asian countries. The main water sources for the Aral Sea are the Amu Darya and the Syr Darya rivers. The water from these rivers is used intensively for the economic sectors in the Central Asian countries. In order to use it efficiently and manage it optimally during operations, a 1-5 day advanced forecast for the Amu Darya flow (the Tuyamuyun Reservoir inflow) is required.

Many researchers have tried to develop a model showing the changes in the Amu Darya's river flow during flooding. The resulting models did not meet the accuracy requirements for hydrological forecasting due to the very complicated hydrological process. The initial information is not sufficient for the detailed equations of the Saint-Venan-type model. The simplified models of Kalinin-Milukov or Maskingam do not take into account that the flood's lag time depends upon water discharge.

Project Results and Findings

During this project the "reservoir model" for river flow in an unstable channel was used. The model is based on the non-linear relationship between water discharge and the river channel's hydraulic parameters, taking into account the Amu Darya channel's high level of instability. The "reservoir model" allows water discharges in the lower reaches to be calculated based on known water levels and discharges in the upper reaches. The main advantages of the model are the dependence of flood lag upon flood discharge and the use of standard observations made at the hydrologic stations as primary model parameters, which simplifies its adaptation to a real water body and facilitates its further use.

When the model was first tested on the Amu Darya River in 1992, it showed good correlation between the measured and calculated hydrographs, which indicated good prospects for positive results on this project.

As is well known, the technology for hydrologic forecasting requires that predetermined values be obtained at precise times and at the lowest possible costs. This package of programs was developed to reduce costs by simplifying work for staff. The programs are designed for specialists with different qualifications and include a hydrologic model and hydrologic database.

The forecast's lead time is determined by the long distance on the river between the Kerki gauge line and the Darganata gauge line (434 km), with the flood peak's lag-time being two to five days.

The following work has been completed under this project:

- A hydrological database adjusted to river reaches has been developed.
- Programs for visual analysis and statistical processing of the measured hydrologic data have been worked out.
- Flow data have been transferred to magnetic tapes and checked by matching hydrographs.
- Essential water use information for the middle Amu Darya River has been collected and shown in the summary table.
- Methods have been developed for adapting the hydrologic model to different information systems.
- Numerical experiments were conducted to assess the compatibility of the forecast method for the Amu Darya River during the period of 1985 - 1996.
- Technology for automated forecasting using computer programs has been developed.

The results of numerical experiments for the period of 1985 - 1996 showed that it is possible to use this project's results for short-term forecasting of the Amu Darya River's flow in the Darganat section and for inflow to the Tuyamuyun Reservoir. The forecast method was rated 95 percent accurate according to W. Juemou's method, based on the World Meteorological Organization's standards (see W. Juemou., 1994, *Methods for Verification of Hydrological Forecasts WMO / TD - No 617*) and 82 percent accurate according to Uzbekistan's system, based on up to a 10% deviation from actual discharges. The efficiency constituted less than 0.29 for the whole period, where 0.75-0.8 is rated as satisfactory, 0.6-0.75 is good, and less than 0.6 is excellent.

Application of Results

The results and the hydrologic model could be used in water management agencies for research on modelling river flow during flooding.

The results of the project could be used in the future for:

- developing forecasting methods in other basins
- modeling optimal water use
- river channel balance calculations
- modeling the movement of pollutants in the river
- building a network model for the river basin

Greater detail on what these uses entail is provided in the full-length report.

For the best use of the project results it is necessary to distribute the program package and the model description among the main users, the hydro-meteorological services of Turkmenistan and Uzbekistan and the BVO "Amu Darya."

The results may also be used to develop an optimal water use regime, for example in calculating the movement of pollutants along the Amu Darya or developing a forecasting method for the Syr Darya River.

The program package and the hydrologic model are also recommended for use by water agencies to:

- develop the optimal water use regime in the Amu Darya basin and coordinate it among different water agencies and the Central Asian Republics.
- carry out control evaluations of water protection measures, for example calculating the water balance along the river considering water users demand on the regional level, or determining the water resources deficit in the Amu Darya basin.

Potential Impacts

The results of this project may help in addressing controversial issues related to computations of water balance and flow in the Amu Darya basin.

Utilization of the model during regular flow periods will improve the operating regime of the Tuyzmuyunsk hydro unit and reduce the wasting of water, and improve the water management regime in the lower Amu Darya River. Using the model for calculating river flow during flooding will aid in developing methods for optimal water management of the middle Amu Darya, by imitating the work of water diversion operations under any given conditions of water use.

The results of this project could be used to assess the influence of water-saving technologies on the water regime of the Amu Darya and to improve the environmental conditions of the Aral Sea basin by saving water.

Regional Cooperation

Regional cooperation took place under this project through the open exchange of hydrologic information between the hydro-meteorological services of Uzbekistan and Turkmenistan, and in consultations on the best way to present computer programs and the hydrologic model.

7

Проект по природоохранной политике и технологии

Контракт No. CCN – 0003 – Q – 00 – 3165

НОВЫЕ
НЕЗАВИСИМЫЕ ГОСУДАРСТВА

ОТЧЁТ

Краткосрочный прогноз стока Амударьи на основе резервуарной модели Прикладной демонстрационный проект № 2

С. Мягков– Октябрь 1996 г.
Delivery Order 08, Task B

Подготовлен для
Миссии в Центральной Азии
Агентство США по международному развитию

Подготовлен:
Региональным офисом в Центральной Азии проекта ППТ,
г. Алматы, Казахстан
Проект по природоохранной политике и технологии
для независимых государств бывшего Советского Союза
Консорциум ЮСАИДа, под руководством CH2M HILL

8

Содержание

Раздел		Страница
Слова признательности		**iii**
Об авторах		**iii**
Материалы и отчёты		**iii**
Перечень акронимов и сокращений		**iv**
Краткий отчёт		**v**
Полный отчёт		**1–1**
1	**Введение**	**1–1**
	Предыстория	1–2
	Объект исследований	1–2
	Физико–географическое описание бассейна Амударьи	1–3
	Гидрологические особенности Амударьи	1–5
	О предыдущих гидрологических моделях реки Амударьи	1–7
	Цели проекта	1–8
	Объем работ	1–9
	Методологическая основа проекта	1–10
	Описание математической модели реки Амударьи	1–10
	Методы адаптации модели	1–15
	При известном боковом притоке	1–16
	При неизвестных составляющих водного баланса	1–16
	Комплексный подход	1–17
	Используемые данные	1–18
2	**Результаты и выводы**	**2–1**
3	**Рекомендации**	**3–1**
	Рекомендации по использованию результатов проекта	3–1
	Для разработки методов прогноза в других бассейнах	3–1
	Для моделирования оптимального водопотребления	3–1
	Для расчета руслового баланса	3–1
	Для моделирования транспорта загрязняющих веществ	3–3
	Построение сетевой модели	3–3
	Рекомендации политической направленности	3–3
	Потенциальное влияние проекта	3–4

9

Приложения A: Описание базы гидрологических данных

Приложения B: Совмещённые графики ежедневных расходов воды Амударьи

Приложения C: Инструкция для пользователя программ

Приложения D: Список литературы

Список таблиц

Номер		Страница
1	Зависимость интенсивности испарения с водной поверхности от времени года для среднего течения Амударьи (средние многолетние значения м3/с).	1 – 17
2	Водозабор (V) и сброс (S) коллекторно – дренажных вод по Лебабскому велояту за период 1991 – 1995 г. (м3/с).	1 – 19
3	Оценки метода прогноза стока реки Амударьи	2 – 1

Список рисунков

Номер		Страница
1	Схема бассейна реки Амударьи	1 – 3
2	Зависимость между расходами и уровнями воды в реке Амударье (створ Керки). Внутри рамки аналитическое уравнение связи.	1 – 12
3	Зависимость времени добегания пика паводка от расходов воды реки Амударьи (Керки – Дарганата).	1 – 14
4	Результат тестирования модели на зависимость времени добегания от расхода воды. Соответсвие осей: X – расстояние, Y – время, Z – расход воды.	1 – 15
5	Прогнозный и измеренный ежедневные расходы воды в створе Дарганата за 1994 год.	2 – 2
6	График невязок водного баланса на участке Керки – Дарганата. Построен с использованием модельных расчётов	3 – 2

10

Слова признательности

Авторы в первую очередь выражают глубокую признательность специалистам Проекта по природоохранной политике и технологии за проявленное внимание и оперативное решение возникавших технических проблем. За содействие при выполнении проекта авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам гидрометслужб Туркменистана и Узбекистана, министерства водного хозяйства Туркменистана, управления БВО "АМУДАРЬЯ".

Об авторах

Мягков С. В. — руководитель проекта, кандидат технических наук, заведующий лабораторией гидрологических прогнозов САНИГМИ.

Купровский В. Н. — исполнитель, начальник отдела гидрологии Гидрометслужбы Туркменистана.

Каландаров И. Д. — исполнитель, кандидат технических наук, директор БВО "АМУДАРЬЯ".

Касьянов А. В. — исполнитель, инженер, разработка программного обеспечения.

Шаяхова Л. А. — исполнитель, оператор компьютера.

Новикова В. А. — исполнитель, оператор компьютера.

Материалы и отчёты

За время выполнения проекта были опубликованы работы и представлены материалы на семинары:

"*Математическое моделирование и современные методы гидрологических расчетов и прогнозов*", Ю. М. Денисов, С. В. Мягков. Тр.САНИГМИ

"*Река и компьютер*", С. В. Мягков, газета "Правда Востока". Ташкент, 22 марта 1996 г.

"*Взгляд из космоса на пустыню*", С. В. Мягков, газета "Правда Востока". Ташкент, 18 июня 1996 г.

"*Эта загадочная Амударья*", С. В. Мягков, газета "Правда Востока". Ташкент, 30 июля 1996 г.

"*The Problems of Water Storage in the Desert*", S. V. Myagkov, L. Shayahova, at the FRIEND seminar, WMO Publ.

"*A Model of the Forecast of the Drainage Water*", S. V. Myagkov, at the 3rd USA/CIS Hydrological Seminar. Tashkent, Sept. 1996

11

Перечень акронимов и сокращений

г. гора

п. пойма

п. пост

ASCII	Американский стандартный код для информационного обмена
БВО "Амударья"	Водохозяйственные объединения "Сырдарья" и "Амударья"
ГГИ	Государственный Гидрологический институт, Ст. Петербург, Россия
САНИГМИ	Среднеазиатский гидрометеорологический институт, Ташкент, Узбекистан
HYDATA	Hydrological data processing and analysis system developed for use on IBM and IBM—compatible personal computers, software from the Institute of Hydrology Wallingford Oxfordshire OX10 8BB UK (Система Гидрологических данных)

12

Краткий отчет

Цель и масштабы проекта

Цель проекта — разработать программу компьютерного моделирования для обеспечения краткосрочных прогнозов движения паводков в реке Амударья. На сегодняшний день проблема Аральского моря является актуальной в масштабе всей планеты, и особенно для стран Центральной Азии. Основными источниками поступления воды в Аральское море являются реки Амударья и Сырдарья. Вода из рек Амударьи и Сырдарьи интенсивно используется в экономике стран Центральной Азии. Для рационального использования и оптимального управления водными ресурсами в оперативном режиме необходим прогноз стока реки Амударьи (приток к Тюямуюнскому водохранилищу) с заблаговременностью от 1 до 5 суток.

Многими исследователями ставилась задача моделирования трансформации паводка по реке Амударье. Однако в конечном результате модель не соответствовала по требуемой точности для применения в практике гидрологических прогнозов в виду чрезвычайной сложности гидрологических процессов в русле реки. Для детальных уравнений типа Сен—Венана недостаточно исходной информации. Упрощенные модели типа Калинина—Милюкова или Маскингама не учитывают зависимость времени добегания пика паводка от расхода воды.

Результаты проекта

Для достижения целей данного проекта была использована "резервуарная модель" потока в реке с деформируемым руслом, основанная на нелинейной зависимости расходов воды от гидравлических параметров русла и с учётом сильной деформационной неустойчивости русла. "Резервуарная модель" позволяет рассчитать расход воды в нижнем створе по известному расходу и уровню воды в верхнем створе. Главные преимущества этой модели — зависимость времени добегания паводка от расхода воды и то, что в качестве исходных параметров модели используются стандартные наблюдения на гидрологических постах, что упрощает ее адаптацию к реальному объекту и дальнейшее использование.

В 1992 году данная модель была впервые аппробирована для Амударьи и показала хорошую сходимость фактических и расчетных гидрографов, что позволило надеятся на получение положительных результатов при выполнении данного проекта.

13

Известно, что технология гидрологических прогнозов требует получение прогнозных величин в максимально сжатые сроки при наименьших затратах. Для снижения затрат был разработан комплекс программ упрощающий работу персонала в оперативном режиме. Программы расчитаны на специалистов различной квалификации.

Заблаговременность прогноза определяется большим расстоянием на участке от створа Керки до створа Дарганата (434 км), время добегания пика паводка составляет от двух до пяти суток.

При реализации проекта были выполнены основные виды работ:

- разработана база гидрологических данных в привязке к створам реки;
- разработаны программы для визуального анализа и статистической обработки измеренных гидрологических данных;
- материалы по стоку перенесены на магнитные носители и выверены методом соответсвенных гидрографов;
- собраны материалы по водопользованию в среднем течении Амударьи и представлены в виде сводной таблицы;
- разработаны методы адаптации гидрологической модели при различном информационном обеспечении;
- проведены численные эксперименты для оценки приемлимости метода прогноза для реки Амударьи за период 1985—1996 годы;
- разработана технология автоматизированного выпуска прогноза с использованием компьютерных программ.

Результаты численных экспериментов за период 1985—1996 годы показали возможность использования результатов проекта для краткосрочного прогноза стока Амударьи в створе Дарганата и притока к Туямуюнскому водохранилищу. Метод прогнозирования был оценён как метод, имеющий 95% точности по системе оценки У. Жемо. В основусистемы Жемо легли стандарты Всемировой метереологической организации" (работа Juemou,1994, Methods for verification of hydrological forecasts WMO/TD—No 650). В соответствии с системой стандартизации узбекистана, данный метод оценивался, как имеющий 82% точности. Узбетская система основана на возможности отклонения в 10% от фактического расхода воды. Эффективность разработанного метода

прогноза для периода 1985 – 1996 г.г. составила менее 0.29 для всего периода(где 0,75 – 0,8 расценивается как удовлетворительное и 0,6 – 0,75 как хорошее, и меньше ,чем 0,6 как отличное).

Применение результатов на пратике

Результаты проекта и гидрологическую модель возможно использовать в водохозяйственных организациях для научных исследований относительно моделирования трансформации паводка по реке.

В перспективе результаты проекта можно использовать для :

- разработки методов прогноза в других бассейнах;
- моделирования оптимального водопотребления;
- расчета руслового баланса;
- моделирования транспорта загрязняющих веществ;
- построения сетевой модели бассейна реки.

Для наилучшего использования на практике результатов проекта необходимо распространить комплекс программ и описание модели среди основных пользователей – Гидрометслужбы Туркменистана и Узбекистана, БВО "АМУДАРЬЯ".

Для других пользователей комплекс программ и гидрологическая модель может использоваться как расчетный полигон для разработки оптимального режима водопользования, например для расчета переноса загрязнений по длине Амударьи или для разработки метода прогноза для реки Сырдарьи.

Пакет программы и гидрологическая модель также рекомендуются для следующих целей:

- разработатка оптимального режима водопользования в бассейне реки Амударьи и его согласование между различными водохозяйственными организациями и республиками Центральной Азии;
- разработатка контрольной оценки мер по охране водных ресурсов. Например для расчета водного баланса по длине реки с учетом требований водопотребителей регионального уровня. Для определения дефицита водных ресурсов в бассейне Амударьи.

16

Потенциальное влияние

Результаты проекта могут помочь при решении спорных вопросов, возникающих при расчете водного баланса и учете стока в бассейне Амударьи.

При эксплуатации гидрологической модели в оперативном режиме улучшится режим эксплуатации Тюямуюнского гидроузла, что приведет к снижению непродуктивных потерь воды, и усовершенствуется режим управления водными ресурсами в нижнем течении Амударьи. При эксплуатации гидрологической модели в режиме расчета трансформации паводка возможно разработать методы оптимального управления водными ресурсами в среднем течении Амударьи при имитации работы водозаборов в заданных условиях водопользования.

Результаты проекта могут быть использованы для оценки влияния водосберегающих технологий и прогнозировать их влияние на водный режим Амударьи. Использование результатов работы позволит улучшить экологическую ситуацию в бассейне Аральского моря в части сбережения водных ресурсов.

Региональное сотрудничество

При реализации проекта было определено в части свободного обмена гидрологической информацией между гидрометеослужбами Узбекистана и Туркменистана, и консультаций для наилучшего представления компьютерных программ и гидрологической модели.

16

ПОЛНЫЙ ОТЧЁТ

Раздел 1
Введение

Проблема Аральского моря является актуальной в масштабе всей планеты, и особенно для стран Центральной Азии. Основными источниками поступления воды в Аральское море являются реки Амударья и Сырдарья. Вода из рек Амударьи и Сырдарьи интенсивно используется в экономике стран Центральной Азии. Для рационального использования водных ресурсов этих рек и оптимального управления в оперативном режиме было необходимо разработать метод прогноза стока реки с заблаговременностью от 1 до 3 суток.

Основная цель работы по проекту —это разработать метод прогноза стока реки Амударьи позволяющий с заблаговременностью от одних до пяти суток прогнозировать расход воды в створе Дарганата и приток к Тюямуюнскому водохранилищу. Для наилучшего представления результатов работы необходимо было разработать комплекс программ, позволяющий расчитывать прогноз стока на персональном компьютере в оперативном режиме.

При решении главных задач проекта были достигнуты дополнительные цели:

- разработана база данных для хранения ежедневных расходов и уровней воды, параметров измеренных расходов воды;
- разработаны методы представления хранимых данных в графической форме для предварительного визуального анализа гидрологических характеристик;
- собрана исходная информация и перенесена на магнитные носители
- и представлена в виде базы данных;
- разработан метод адаптации модели к другим рекам;
- проведен анализ водного баланса для среднего течения Амударьи.

Разработка программного обеспечения проводилась в основном в Ташкенте. В Ургенче были уточнены выходные параметры программ и усовершенствованы модули для выпуска прогноза в оперативном режиме с учетом разрывов в информации. В разработке программного обеспечения авторы придерживались общепринятых стандартов для программ в области гидрологии. Гидрологические данные и данные по водопользованию собирались в Ашгабаде и Ургенче. Часть данных по измеренным расходам

воды была перенесена из не систематизированных архивов САНИГМИ на ЕС – ЭВМ. Данные на 1996 год предоставлены по системе HYDATA Туркменского Гидромета.

Для прогноза стока Амударьи в среднем течении используется "резервуарная модель", которая позволяет рассчитать расход в нижнем створе по известному расходу и уровню воды в верхнем створе с учетом использования стока потребителями. Заблаговременность прогноза определяется большим расстоянием на участке от створа "город Керки" до створа "город Дарганата " (434 километра), время добегания пика паводка составляет от двух до пяти суток. Модель представлена в виде компьютерной программы с базой данных по стоку Амударьи.

Проект ориентирован на потребности Гидрометеослужб Узбекистана и Туркменистана, БВО "АМУДАРЬЯ". Применение в оперативной практике позволит оптимизировать водопотребление в бассейне Амударьи и улучшить экологическую ситуацию в бассейне Аральского моря в части сбережения водных ресурсов.

В перспективе предполагается адаптация модели к бассейну Сырдарьи. А также дополнение модели блоком расчета переноса растворимых в воде загрязняющих веществ с учетом известного поступления.

Излагается метод разработки краткосрочного прогноза стока реки Амударьи на основе резервуарной модели. Рассматриваются специфические проблемы Амударьи как природного объекта. Приводится описание модели и метода ее адаптации для потока с сильно деформируемым руслом и динамическими изменениями гидравлических связей.

1.1 Предыстория

1.1.1 Объект исследований

Амударья – относится к наиболее крупным рекам мира. Ее длина составляет 2600 километров, площадь водосбора 465 тысяч квадратных километров, средний годовой расход воды более 1000 кубометров в секунду. Река протекает по территории Таджикистана, Туркмении, Афганистана и Узбекистана. При тойже площади водосбора, что и у Сырдарьи, Амударья приносит Аральскому морю почти в два раза больше воды. От водности Амударьи и уровня водопотребления в ее бассейне зависит режим Аральского моря. Река Амударья является исключительно сложным природным объектом со множеством специфичеких особенностей.

1.1.2 Физико—географическое описание бассейна Амударьи

Как указывает Шульц В. Л. (1965) отличительные особенности климата горной области бассейна Амударьи (рис.1), где формируется сток являются: преобладание зимне—весенних осадков, высокаая увлажняемость осадками периферийных хребтов, высокие температуры воздуха. В верховьях бассейна наблюдается проявление денудационных и эрозионных процессов.

Почти вся гидрографическая сеть бассейна Амударьи сосредоточена в горной части. От слияния рек Вахш и Пяндж Амударья имеет притоки только на протяжении 180 км, на остальной части река разбирается на орошение, теряет воду на испарение и фильтрацию. Сток реки Амударьи формируется в основном стоком рек Вахш и Пяндж. Сток этих рек образуется за счет таяния сезонного снега и высокогорных ледников, дождей в весенне—осенний период.

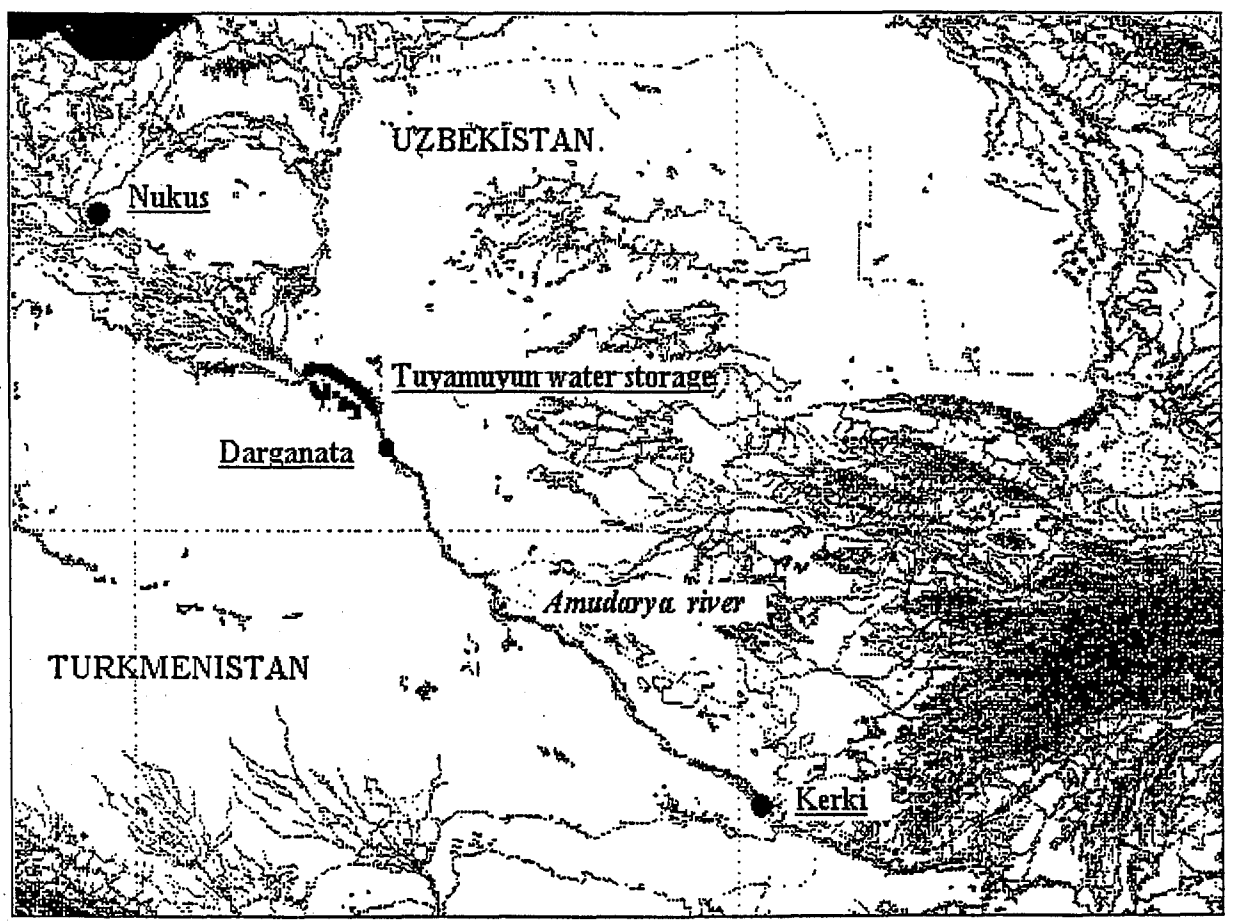


Рис.1 Схема бассейна реки Амударьи

На участке от г. Керки до теснины Ильчик ширина пойменной долины от 4 км до 25 км. Ширина поймы не превышает 9 км. Пойма в высокие половодья затопляется. Русло реки умеренно извилистое, большей частью сильно разветвленное. В русле много островов до 10—18 км длиной и 2.0—2.5 км шириной. Ложе реки крайне изменчивое. Берега реки большей частью обрывистые или крутые. В период прохождения половодья подвергаются интенсивному разрушению.

На участке от теснины Ильчик до п. Дарганата долина реки приобретает хорошо выраженную ящикообразную форму. Ширина долины в пределах 2.0—4.0 км. Береговые обрывы сложены в основном континетальными третичными отложениями, которые представлены толщей желтовато—серых и желтых песков, рыхлых песчаников. Русло реки слабо и умеренно извилистое, умеренно разветвленное. Протоки и острова встречаются редко. В отличие от верхних участков преобладает глубинная эрозия.

Средний многолетний расход воды Амударьи в створе г. Керки за период 1911—1960 годы составлял 2010 м3/с. В период март—сентябрь 2800 м3/с в период декабрь—февраль 898 м3/с. За период 1960—1995 годы средний годовой расход составил 1550 м3/с. За март—сентябрь 2150 м3/с и декабрь—февраль 764 м3/с.

Водный режим Амударьи харатеризуется значительными вариациями внутригодового распределения стока. Наибольший зарегестрированный расход воды в створе Керки составлял 9060 м3/с (20 VII 1958). В основном максимальные расходы воды не превышают 8000 м3/с. В 65% случаев максимальные расходы лежат в пределах 5000 — 7000 м3/с. Наименьший наблюденный расход воды у г. Керки 302 м3/с (7 III 1987). В створе Дарганата за период наблюдений средний годовой расход составляет около 1080 м3/с, за март—сентябрь 1440 м3/с, за декабрь— февраль 660 м3/с.

Максимальные потери воды в русле и пойме реки имеют место в апреле—июне, в особенности в мае и июне, когда наблюдается интенсивное увеличение расходов и подъем горизонтов воды. Потери воды в это время помимо потерь на испарение и питание грунтовых вод объясняются заполнением русла и поймы и просачиванием воды в почво—грунты. В июле потери резко снижаются, так как расходование воды на заполнение русла прекращается. В период апрель—сентябрь на распределение потерь оказывает сильное влияние аккумулирующая способность русла и поймы. Так как в этот период наблюдаются особенно резкие изменения горизонтов воды.

По стоку взвешенных наносов Амударья занимает одно из первых мест на земном шаре. Ее сток превосходит сток Нила и в верхнем течении приблизительно равен стоку взвешенных наносов реки Колорадо в дельте, про которую американцы образно говорят , что ее "вода слишком густа, чтобы ее пить, и слишком жидка, чтобы пахать". Годовой сток взвешенных наносов у г. Керки в среднем составляет 200 млн.т.

На участке от г. Керки до Чарджоу в многоводные и близкие к среднему по водности годы происходит некоторое увеличение стока взвешенных наносов к концу участка (размыв русла). В маловодные годы сток наносов практически одинаков.

На участке от Чарджоу до Дарганаты сток взвешенных наносов практически постоянен. В среднем мутность воды у г. Керки составляет от 3.22 кг/м3 до 4.04 кг/м3. Максимум стока взвешенных наносов наблюдается в мае—июне и составляет до 74% от годового количества. В основном взвешенные частицы мелкие. Фракции частиц размером менее 0.05 мм составляют 73.4% от общего количества. В районе г. Керки ледовые образования выражены отчетливо и наблюдаются почти ежегодно. В отдельные годы устанавливается ледостав продолжительностью до 10—12 дней. В районе г. Чарджоу ледостав также редок, но отдельные рукава замерзают ежегодно. В целом продолжительность ледостава на реке Амударье увеличивается вниз по течению реки. Перечисленные особенности реки Амударьи обуславливают трудности при проведении гидрологических исследований и определяют специфические проблемы.

1.1.3 Гидрологические особенности Амударьи

Одной из важнейших задач при определении стока реки является задача измеренения стока. Для определения водоносности реки на ней проводятся измерения расходов воды. Измерение расхода воды очень трудоемкая работа. Расход воды в Амударье измеряют с лодок и катеров, что является весьма дорогостоящей процедурой. По этой причине измерять расход каждый день невозможно. Ежедневно измеряются только уровни воды, а расход воды расчитывается по аналитической зависимости от уровней.

Само значение измеренного расхода воды имеет некоторую погрешность, которая обуславливается рядом объективных причин. Погрешность измерения расхода воды в Амударье может достигать значительных размеров и иногда доходит до 20% от стока. Эти погрешности обуславливаются сложным строением русла реки, которое имеет широкую пойму, затопляемую паводком, где на скорость течения влияют затопленные сезонные кустарники, косоструйностью течения и многое другое.

Экспедиционными исследованиями Государственного Гидрологического Института (ГГИ) на реке Амударье под руководством Карасева И.Ф. установлено, что погрешности гидрометрических данных для стока за декаду составляют 10—15%, в целом погрешность измерения расходов воды в паводок составляет 7%. Потери стока в среднем течении Амударьи, по оценке Савельевой А. В. (1983), за счет руслового регулирования не превышают 8%, береговое регулирование составляет 3%.

Вторая проблема состоит в том, что русло реки деформируется. То есть дно реки Амударьи крайне нестабильно, в некоторых местах происходит

22

углубление, в то время как в других наоборот, отметка дна реки повышается. Этот процесс непрерывно продолжается и обуславливается большим количеством взвешенных и влекомых по дну наносов.

Увеличивается расход воды, а вместе с ним и скорость течения и поток воды поднимает со дна песок и переносит его на другое место. Снижается расход и скорость воды и наиболее тяжелые частицы оседают на дно. Таким образом дно реки находится в постоянном динамическом процессе. А это приводит к тому, что при одинаковых уровнях воды может быть различный расход, и опять расчетный расход воды отличается от истинного. В Амударье часто наблюдается процесс размыва дна реки при снижении скорости воды, что казалось бы противоречит законам гидравлики. Но этот процесс объясняется перемещением продольных песчанных гряд по длине реки.

В низовьях Амударьи проводились исследования, которые показали постоянное движение подводных гряд в течение года независимо от значения расходов воды. Этот процесс очень похож на процесс передвижения барханов по пустыне под влиянием ветра.

В среднем течении Амударьи долина реки сложена из легко проницаемых почвогрунтов, которые могут служить накопителями для воды при прохождении паводков. При высоких уровнях вода из реки проникает в грунты и затем, когда уровень снижается, вода возвращается в реку. Этот процесс называется русловым регулированием и также влияет на точность измерения стока.

Приведем описание исследуемых гидрологических постов для наилучшего понимания геоморфологического режима реки в среднем течении.

Пост Керки расположен в центре Керкинского оазиса, вблизи железно—дорожной станции Керкичи. Прилегающая местность представляет собой слабовсхолмленную равнину, которая на значительном расстоянии от реки по левобережью постепенно переходит в песчаную пустыню. Долина реки неясно выраженная. Правобережная пойма шириной 0.1 —0.4 км, луговая. Левый берег укреплен водозащитными дамбами. Оба берега поросли осокой, камышом, тростником.

В плане русло слабоизвилистое, сложено песчаноилистыми аллювиальными отложениями, значительно деформирующиеся. На участке поста периодически появляются и исчезают отмели и острова, образуются протоки, в связи с чем наблюдается сильная косоструйность течения. Стрежень реки блуждает от одного берега к другому.

Ледовые явления, как правило отсутствуют. Расходы воды измеряются с лодки, местоположение вертикалей определяется засечками мензулой.

Пост "водокачка Дарганата" начал производить гидрометрические работы в связи со строительством Тюямуюнского гидроузла. Рельеф прилегающей местности — песчанная пустыня с вкрапленными в нее глинистыми такырами. Растительность типично пустынная —верблюжья колючка и местами редкий саксаул.

Долина реки трапецеидальная, шириной 2 — 2.5 км. Склоны долины крутые, местами обрывистые, правый склон высотой до 10—12 метров, левый — до 20 метров. Оба склона сложены песчаником. Дно долины сложено речными отложениями, заросло тростником, камышом и кустарником, используется под посевы хлопчатника и бахчевых культур.

Русло реки прямолинейное, сложено песчаноилистыми аллювиальными отложениями, подвержено значительной деформации. Берега обрывистые, высотой 2—3 м, устойчивые. В створе основного поста установлен самописец уровня воды ГР—38. Уклон водной поверхности определяется по уклонным постам речного типа, расположенным на левом берегу в 328 метрах выше и в 672 м ниже основного водпоста. Гидроствор расположен в 86 м ниже основного водпоста и закреплен вехами. Расходы воды измеряются с катера и лодки, местоположение вертикалей определяется засечками мензулой.

1.1.4 О предыдущих гидрологических моделях реки Амударьи

Многими исследователями ставилась задача моделирования трансформации паводка по реке Амударье. Однако в конечном результате модель не соответсвовала по требуемой точности для применения в практике гидрологических прогнозов в виду чрезвычайной сложности гидрологических процессов которые происходят в русле реки.

В практике гидрологических расчетов распластывание паводков расчитывается тремя способами:

- метод соответсвенных расходов воды;
- метод Калинина—Милюкова;
- метод Сен—Венана.

Как указывает Ляховская Л.Ф.(1990) метод Калинина—Милюкова был апробирован для среднего течения Амударьи и оказался непригоден. Причина заключается в том, что отсутствует монотонное увеличение ширины реки вниз по течению, в связи с чем не возрастают емкости руслового регулирования, одного из основных факторов, обуславливающего распластывание паводка. Особенность морфологического строения русла

реки Амударьи одна из причин плохого результата расчета по методу Калинина — Милюкова.

Другой причиной являются резкие изменения расходов воды в течении суток и отсутствие более частых по времени и длине участка измерений, как необходимое условие использования в данном методе стандартных кривых добегания Пуассона или вероятностной кривой Буракова.

Денисовым Ю.М. (1989) был разработан метод расчета движения воды в открытом русле на основе решения уравнений Сен — Венана при упрощающих предположениях, а именно средняя скорость потока по живому сечению принята одинаковой. В результате получено дифференциальное уравнение второго порядка по длине потока в частных производных.

Как указывает Ляховская Л.Ф. (1990) модель Денисова Ю.М. при использовании фактических данных не дает заблаговременности расчетов. Для использования этой модели в гидрологических прогнозах необходим прогноз начальных условий. Ошибка расчета по модели Денисова Ю.М. больше 10% от фактически наблюдаемых значений отмечается в 68% случаев.

Среди упрощенных методов использовался метод на основе статистических уравнений с использованием зависимости времени добегания от расходов воды в верхнем створе. Однако теснота связи составляет всего 0.77 при эффективности 0.64. При этом пришлось учесть специфику Амударьи и упрощенный метод превратился в систему уравнений, каждое из которых необходимо использовать в зависимости от величины расхода воды в верхнем створе и предполагаемого времени добегания. При этих условиях разница от расчетного значения расхода свыше 10% составила 28 — 50% от исследуемого числа случаев.

1.2 Цели проекта

Основная цель работы по проекту — это разработать метод прогноза стока реки Амударьи позволяющий с заблаговременностью от одних до пяти суток прогнозировать расход воды в створе Дарганата и приток к Тюямуюнскому водохранилищу. Разработанный метод прогноза отвечает требованиям предъявляемым к гидрологическим прогнозам по общепринятым в мировой практике критериям. Эффективность разработанного метода прогноза для периода 1985 — 1996 г.г. составила менее 0.27, что говорит о возможности использования данного метода в оперативной практике.

Для наилучшего представления результатов работы необходимо было разработать комплекс программ позволяющий расчитывать прогноз стока на персональном компьютере в оперативном режиме.

При решении главных задач Проекта были достигнуты дополнительные цели:

- разработана база данных для хранения ежедневных расходов и уровней воды, параметров измеренных расходов воды;

- возможность представления хранимых данных в графической форме для предварительного анализа гидрологических характеристик и выявления явных ошибок ввода информации;

- собрана исходная информация и перенесена на магнитные носители и представлена в виде базы гидрологических данных;

- разработан метод адаптации модели к реальному объекту, что позволит использовать данную гидрологическую модель для других рек.

1.3 Объём работ

В результате работы на проектом были выполнены следующие виды работ.

1. Разработана база гидрологических данных, которая включает в себя: модули для ввода и корректировки гидрологической информации в базе данных гидрологической модели (расходы, уровни, скорости воды и т.д.), модуль обмена гидрологической информацией в формате ASCII для стыковки с другими информационными системами, модуль графического отображения и статистической обработки данных, модуль построения связей расходов воды с гидравлическими параметрами потока. Модуль отображения результатов расчета и прогноза на плане—схеме Амударьи в режиме Геоинформационной системы. Введена карта—схема Амударьи. Разработано главное меню пользователя. Включены все модули в главную программу.

2. Собраны исходные данные по стоку и перенесены на магнитные носители в базу данных.

3. Собран материал по использованию стока Амударьи в среднем течении.

4. Разработана программа реализующая гидрологическую модель для работы в оперативном режиме.

5. Разработан алгоритм учета полноты данных в модели.

7. Проведена адаптация гидрологической модели к параметрам реки Амударьи.

8. Проведены численные эксперименты для оценки метода прогноза.

9. Подготовлена документация. Детальное описание модели и данных. Руководство пользователю.

10. Работы над проектом проводились в Ташкенте (декабрь 1995 — октябрь 1996), Ашгабаде (июнь — июль 1996), Ургенче (август — сентябрь 1996).

1.4 Методологическая основа проекта

1.4.1 Описание математической модели реки Амударьи

Основу предлагаемого метода прогноза составляет математическая модель реки, определяемая общепринятым термином "резервуарная". Основу модели составляют уравнение баланса и уравнение движения воды. Модель построена специально для условий Амударьи. Расчетная схема выгодно отличается от других тем, что время добегания пика паводка зависит от расходов воды и учитывается сильная деформационная неустойчивость русла. Уравнение движения воды определяется гидравлическими характеристиками русла с учетом его деформируемости. Предлагаемая модель — это нелинейная математическая модель водного потока, позволяющая расчитывать движение паводка по длине реки в заданном пространственно — временном масштабе. По известным поступлениям в верхнем створе расчитывается расход воды на всем протяжении реки. Для моделирования открытых потоков часто используется уравнение водного баланса в виде :

$$dA/dt + d\,Q/dX = P \qquad (1)$$

где **A** — площадь живого сечения,
Q — расход воды,
P — боковой приток на единицу длины,
t — время,
X — координата по длине.

В качестве уравнения движения для простых (с точки зрения гидравлических явлений) течений широко используется уравнение Шези, без инерционных составляющих :

$$V = C * SQRT\,[\,K * I\,] \qquad (2)$$

где **V** — скорость течения,
C, K, I — гидравлические характеристики потока.

где **V** — скорость течения,
C, K, I — гидравлические характеристики потока.

При численной реализации модели основанной на применении уравнений (1) и (2) необходим набор параметров русла, характеризующих течение, но главное требование это жесткая и статистически тесная связь между гидравлическими характеристиками потока: площадью поперечного сечения, смоченным периметром, гидравлическим радиусом и уровнем воды в реке. От тесноты этих связей непосредственно зависит точность результатов и сходимость расчетных и фактических гидрографов по гидрометрическим створам. Теснота связи расходов воды и других гидравлических параметров потока от уровня воды в реке зависит от деформационной устойчивости русла. Так как русло реки Амударьи подвержено сильным деформациям, метод использующий статистическую связь от уровней воды не подходит. На рис.2. приведена связь между расходами и уровнями воды в створе Керки по измеренным расходам воды.

Конечно — разностное представление уравнения (1) при отсутствии инерционных составляющих в уравнении (2) аналогично последовательной системе балансовых уравнений для участка реки:

$$dW_j / dt = Q_{j-1} - Q_j + P_j - V_j \qquad (3)$$

где W_j — запас воды на j — том участке,
Q_j, Q_{j-1} — выходящий и входной расходы воды соответственно,
P_j — приток на участке (сброс дренажных вод, осадки и др.),
V_j — потери воды (водозабор, испарение и др.).

В общем случае запас воды на участке можно выразить в следующей форме:

$$W_j = A_j * L_j \qquad (4)$$

где L_j — длина участка реки.

Исходим из того положения, что для участка конечной длины изменение площади живого сечения незначительно и при численной реализации им можно пренебречь, т.е. $dA_j/dL_j = 0$. Следует заметить, что для численной реализации уравнений (1) и (2) вводится анологичное допущение.

Для использования в численном решении уравнения Шези, необходимо задать уровень свободной поверхности, следовательно применение уравнения (2) ограничивается потоками с недеформируемым руслом, или по крайней мере, с тесной связью между расходами и уровнем воды в реке. Иначе индентификация параметров уравнения (2) (коэффициент шероховатости, показатель степени) вызовет значительные трудности и не гарантирует требуемой точности при последующих расчетах.

Воспользеумся подходом когда расход воды выходящий из j —того участка предпологается пропорциональным объему воды на участке, т.е. $\mathbf{Q_j = C_j \cdot W_j}$, при допущении линейности участка можем записать в виде : $\mathbf{Q_j = L_j \cdot f(A_j)}$.

Этот подход не требует однозначной зависимости характеристик потока от уровней воды в реке, т.к. для неустановившегося течения нельзя вводить допущение об однозначности связи расходов с уровнями.

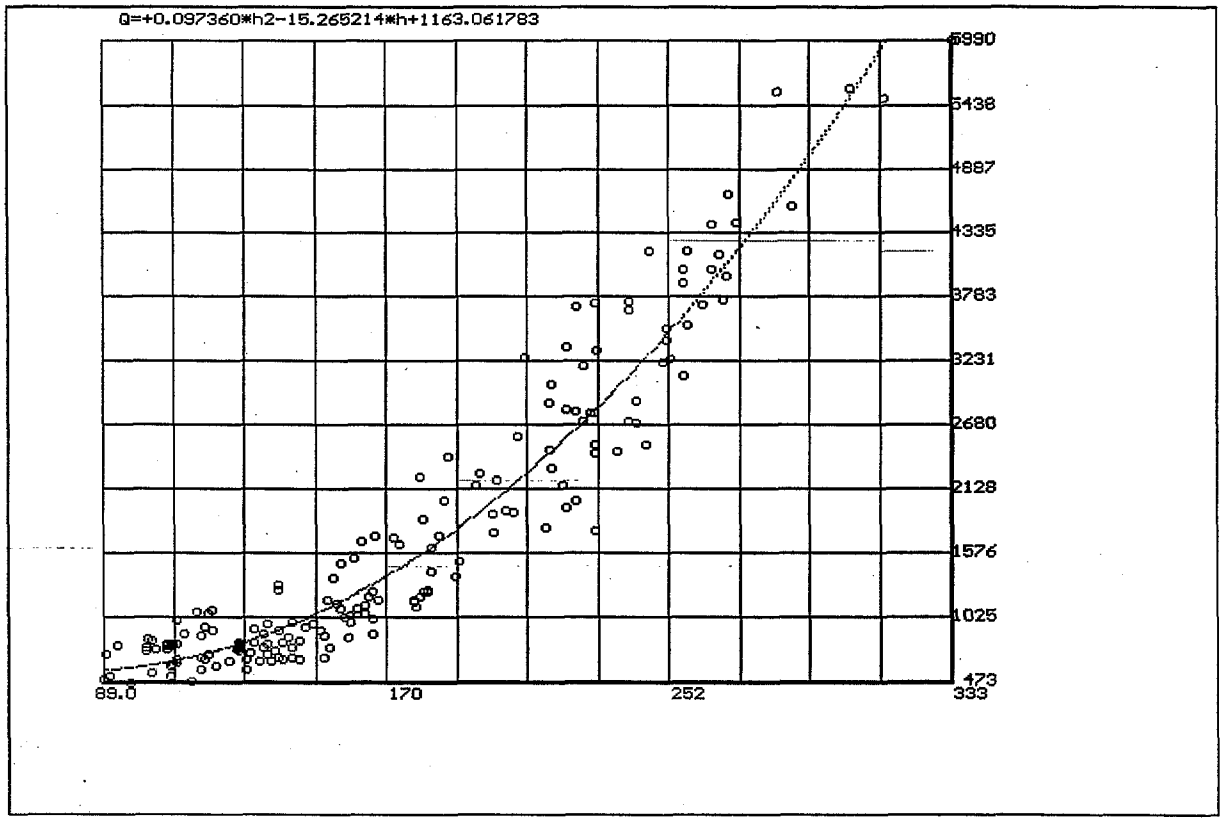


Рис. 2 Зависимость между расходами и уровнями воды в реке Амударье (створ Керки). Внутри рамки аналитическое уравнение связи.

При прохождении паводковой волны кривая связи для какого—либо створа будет иметь форму петли, которая свидетельствует, что для одной и тойже глубины потока имеется несколько расходов воды, причем каждый паводок может дать свою петлю. При использовании нелинейной зависимости заметно повышается коэффициент корреляции в сравнении с линейной. С учетом вышеизложенного, уравнение (3) может быть представлено в виде:

$$\mathbf{L_j \cdot (dA_j / dt) = Q_{j-1} - Q_j + P_j - V_j} \qquad (5)$$

Идентификация уравнения (5) по существу сводится к определению коэффициентов зависимости расхода воды в реке от площади живого сечения Особое внимание при численной реализации модели уделяется подбору численных значений коэффициэнтов характеризующих связь:

$$Q = a * A * A + b * A .$$

Параметры "**a**" и "**b**" подбираются на основе данных по измеренным расходам воды методом наименьших квадратов.

Численное решение модели сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений разностными методами. Для решения подобных систем существует множество разностных методов. Ввиду нелинейности параметров в правой части уравнения неявные методы решения не подходят. Методы типа Рунге—Кутта, Адамса—Бошфорта или Двухшаговый в сравнении с явными методами имеют несколько большую точность, однако требуют большего времени вычислений. Поэтому используется явная схема Эйлера с оптимизацией расчетного временного шага. Что дает значительное снижение реальных затрат ремени при расчетах.

В нашем случае схема Эйлера записывается в виде :

$$A_j^{t+t} = A_j^{t} + t * (Q_{j-1}^{t} - Q_j^{t} + P_j^{t} - V_j^{t}) \qquad (6)$$

где **A** — площадь поперечного сечения потока,
Q — расходы воды,
t — шаг расчета по времени.

Метод является безусловно устойчивым при выполнении условия :

$$t <= - 2 / (d (Q_{j-1}^{t} - Q_j^{t}) / dA_j^{t}) \qquad (7)$$

Эта схема удовлетворяет требованиям точности и отличается эффективностью вычислений. Для расчетов составлен алгоритм решения для системы с переменным количеством уравнений (количество уравнений равно количеству участков реки) и модель была протестирована на соответсвие основным требованиям. То есть соблюдается зависимость времени добегания от величины расхода. На рис. 3 приведена зависимость времени добегания пика паводка от расходов воды в реке Амударье между створами п. Керки и п. Дарганата. Эта зависимость построена по анализу гидрографов стока за период 1985 —1995 г.г. с использованием метода Погсона (метод Погсона применяется для определения максимума и минимума блеска переменных звезд по половинам хорд от наблюдаемых

значений). Таким образом модель должна удовлетворять требованию этой зависимости.

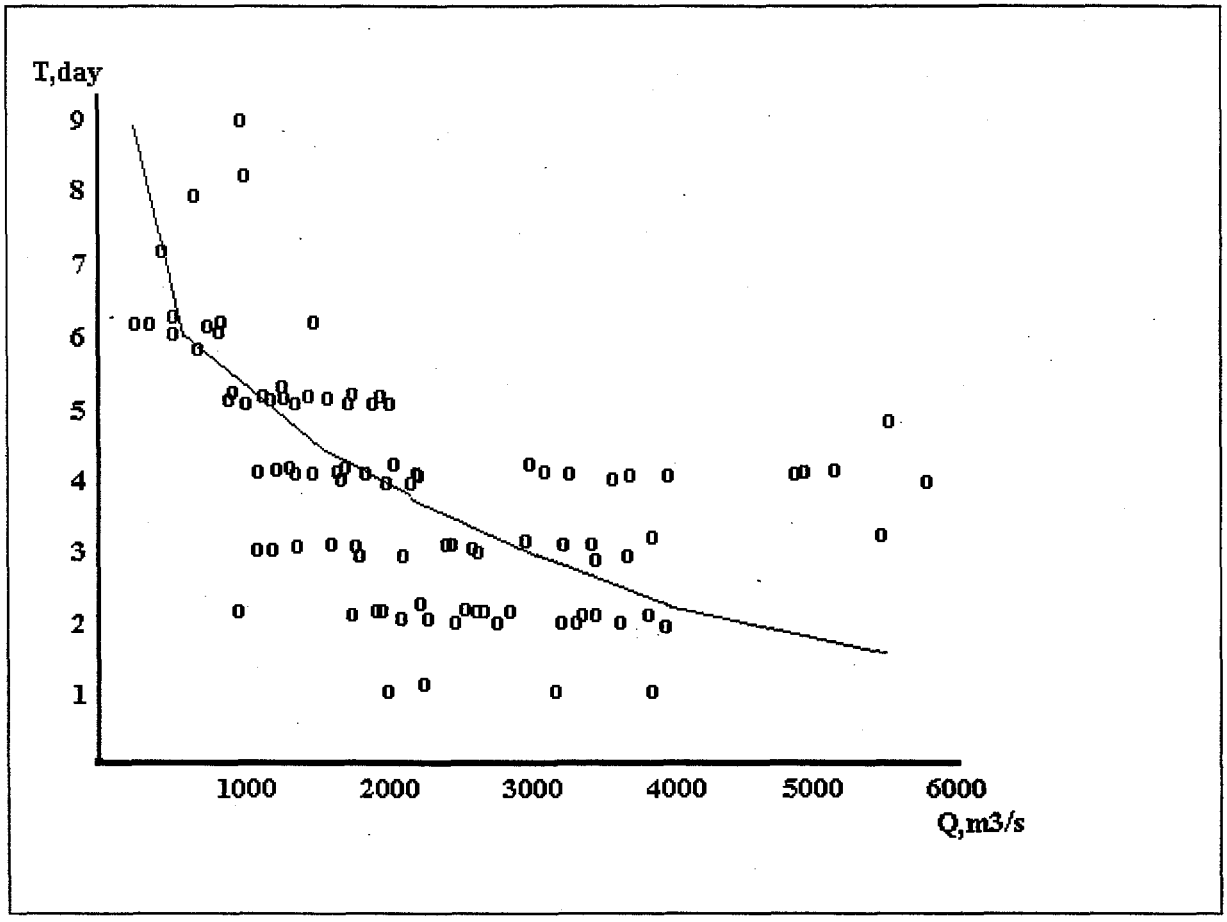


Рис. 3 Зависимость времени добегания пика паводка от расходов воды реки Амударьи (Керки — Дарганата).

В качестве теста принят распространенный тест для подобных моделей, в котором задается начальный паводок треугольной формы и прослеживается процесс трансформации по длине реки.

На рис. 4 приведены результаты тестирования модели при различных начальных условиях. Заметно изменение расстояний между пиками паводков при различных расходах воды. Каждый равносторонний паводок в процессе прохождения по длине реки принимает характерную волнообразную форму. Больший паводок нагоняет меньший, расстояние сокращается, а другой меньший паводок наоборот отстает.

Для разработки и оценки метода прогноза необходимо было выполнить анализ работы модели на фактических данных за многолетний период.

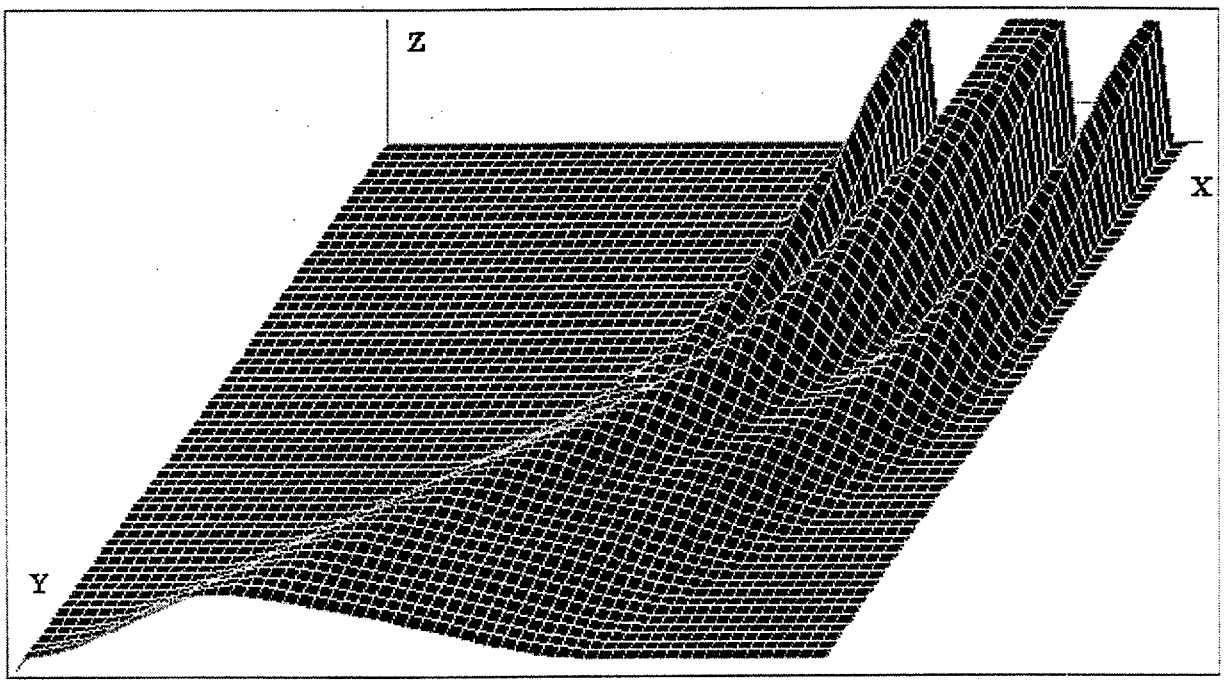


Рис.4 Результат тестирования модели на зависимость времени добегания от расхода воды. Соответствие осей: **X** — расстояние, **Y** — время, **Z** — расход воды.

1.4.2 Методы адаптации модели

Для работы модели в прогностическом режиме необходимо адаптировать ее параметры к реальному объекту. Необходимо чтобы расчетные значения расхода и уровня воды в нижнем створе соответствовали измеренным значениям.

Известно, что сами измерения имеют погрешности и в среднем допускается: для уровней воды — 1 см, для расходов воды погрешность измерения составляет от 3 до 5% от значения расхода.

В условиях Амударьи в створах Керки и Дарганата часто погрешность измерения расхода воды превышает 10 — 20%. Следовательно, если расчетное значение стока находится в этих пределах, тогда результат прогноза считается удовлетворительным.

Для точного решения трансформации паводка необходимо знать все составляющие водного баланса на расчетном участке реки. Но в оперативном режиме эта проблема решается не всегда. Поэтому для расчета прогноза были выбраны паралельные подходы.

32

При известном боковом притоке. Для упрощения, под боковым притоком подразумевается сумма всех составляющих водного баланса для участка реки: водозабор, сброс коллекторно—дренажных вод, потери на фильтрацию в почвогрунты, потери на испарение с водной поверхности и др..

В реальном времени составляющие водного баланса могут быть заданы при производстве расчетов как по длине реки (отдельно для каждого участка), так в виде суммы отнесенной ко всей длине в целом. Но этот подход практически неразрешим в оперативном режиме, так как требуется значительное время для сбора данных, что приведет к уменьшению заблаговременности прогноза. Либо необходимо задавать лимиты по водозабору и приближенное значение сброса коллекторно—дренажных вод.

Однако для целостного решения задачи этот вариант предусмотрен. Этот вариант возможно использовать для корректировки исходных данных в процессе составления водного баланса, когда достаточно реального времени для производства расчетов.

При неизвестных составляющих водного баланса. Для прогноза в реальном времени для составляющих водного баланса используются общие закономерности выявленные в процессе исследований. Для испарения с водной поверхности используются средние многолетние данные полученные по атласу. Для участка Керки—Дарганата испарение зависит от времени года и его можно принять согласно (таб. 1). Заметим однако, что величина испарения несоизмеримо мала по сравнению с погрешностью измерения стока.

Для водозабора и сброса коллекторно—дренажных вод также возможно принять средние значения, но ввиду некоторой независимости этих параметров от природных процессов необходимо проводить корректировку с учетом влияния общей ситуации.

Для процесса руслового регулирования принимается зависимость потерь—приобретений стока от динамики уровня воды. При росте уровня воды считается, что потери зависят от отношения изменения уровня к интервалу времени за который это превышение произошло. Для приобретений используется обратное предположение.

Для учета доли жидких осадков используется произведение слоя осадков на ближайшей метеостанции на площадь водной поверхности. Приближенно площадь водной поверхности принимается как произведение средней ширины на длину участка. Для Амударьи на участке Керки—Дарганата средняя площадь водной поверхности приближенно равна 8.0E+08 м2. Однако долю жидких осадков на поверхность воды можно принять незначительной, во—первых она находится в пределах ошибки измерений

стока, во вторых интенсивность осадков мала в течение всего года, ливневые осадки очень редки и непродолжительны.

Таблица 1 Зависимость интенсивности испарения с водной поверхности от времени года для среднего течения Амударьи (средние многолетние значения м3/с).

Зима	Весна	Лето	Осень
10.1	64.5	135	44.8

Комплексный подход. Главным критерием прогноза является его точность. Поэтому для повышения точности прогноза лучше использовать комплексный подход, при котором известные составляющие учитываются.

Для настройки модели при неизвестном притоке предполагается, приток или потери происходят непрерывно и изменяются плавно. Неизвестный приток или потери находят исходя из уравнения водного баланса. В нашем случае можно использовать разницу между расчитанным и измеренным расходом в нижнем створе, так как параметры модели определяются назависимо от значений числового ряда (не статистическим методом). Тогда этот процесс можно описать в виде уравнения :

$$dP/dt = Q_f - Q_r \qquad (8)$$

где Q_f, Q_r — расходы воды в створе измеренный и расчитанный соответственно.

Используя в виде разностной схемы :

$$P(t+1) = P(t) + t * [Q_f(t) - Q_r(t)] / 2.0 \qquad (9)$$

при $ABS[P(t+1) - P(t)] >= 5\ \%$ от Q_f

$$P(t+1) = P(t) \qquad (10)$$

при $ABS[P(t+1) - P(t)] < 5\ \%$ от Q_f

Предел в 5% выбран на основе численных экспериментов. При снижении предела менее 3% возникают дополнительные флуктуации численной схемы из—за превышения ошибок измерений, в этом случае расчетный гидрограф принимает резковыраженную пульсационную форму. При повышении предела свыше 10% происходит накопление ошибки и возникают резкие скачки при прохождении паводковой волны, хотя пульсаций практически нет.

Анализ показал, что применение комплексного метода позволяет осуществлять прогнозные расчеты без учета балансовых составляющих, что является важным результатом для оперативной практики, так как значительно снижает затраты времени и труда.

Для анализа метода прогноза рассматривался период с 1985—1995 годы. Была выявлена необходимость постоянной настройки параметров модели в процессе ее эксплуатации в связи с изменениями гидравлических параметров русла Амударьи.

Параметры необходимо определять не за весь период времени, а за некоторый интервал близкий к дате прогноза. Длина интервала определяется в виде количества измеренных расходов воды, параметры которых принимаются в качестве расчетных. В результате исследований установлено (по критерию соответствия расчетных значений фактическим), что необходимо принимать от 15 до 20 измерений.

Меньшее число принимаемых измерений может дать обратный наклон функциональной зависимости, большее число измерений приводит к использованию устаревших гидравлических параметров русла. Процесс настройки параметров в оперативном режиме производится автоматически.

1.4.3 Используемые данные

Для построения линейной схемы были использованы топографические карты. В качестве верхнего створа принят пост расположенный у города Керки. Для адаптации модели и проверки точности прогноза были использованы данные по гидрологическим створам реки Амударьи.

По станциям Кеки и Дарганата использовались следующие данные:

ежедневные расходы и уровни воды, для контроля точности расчетов по модели;

параметры измеренных расходов воды (дата, уровень, расход, площадь сечения потока, средняя и максимальная скорость потока, ширина, максимальная и средняя глубина, уклон водной поверхности).

Для воднобалансовых расчетов были использованы среднемесячные значения водозабора и сброса коллекторно—дренажных вод. Использовались данные по территории Туркменистана по Лебабскому вилояту (бывшая Чарджоуская область) за период 1991—1995 года, водозабор Каракумского и Амубухарского канала. В таб. 2 приведены параметры водозабора и сброса коллекторно—дренажных вод.
Для хранения, первичной обработки и обеспечения быстрого доступа к данным была разработана база данных. Для расчета параметров модели

использовались программы и графический интерфейс входящие в состав разработанной базы данных (приложение 1).

Таблица 2 Водозабор (**V**) и сброс (**S**) коллекторно—дренажных вод по Лебабскому велояту за период 1991 —1995 г. [м3/с]

	1991		1992		1993		1994		1995	
	V	**S**	**V**	**S**	**V**	**S**	**V**	**S**	**V**	**S**
Январь	0	39	0	45	6	41	15	37	10	42
Февраль	79	44	97	50	114	59	139	41	148	49
Март	234	83	216	102	190	100	146	74	171	71
Апрель	140	123	110	133	129	109	112	82	135	69
Май	132	120	120	109	154	97	151	71	153	63
Июнь	242	124	219	79	238	101	218	74	188	61
Июль	297	128	293	70	294	113	297	82	264	64
Август	281	124	270	73	232	105	268	78	262	64
Сентябрь	179	102	188	63	151	88	153	74	157	60
Октябрь	81	83	84	50	89	76	98	61	92	54
Ноябрь	41	65	43	44	44	62	62	47	63	50
Декабрь	0	42	2	40	0	52	8	39	133	45

36

Раздел 2
Результаты и выводы

Для получения оценок метода прогноза по модели были приняты следующие критерии: эффективность метода прогноза, допустимая погрешность, оправ—дываемость [Juemou W.(1994)]. Результаты тестирования по этим критериям рассчитаны в таб. 3:

Таблица 3 Оценки метода прогноза стока реки Амударьи

Год	Эффектив ность	Допустимая погрешность	Оправдыва емость
		$м^3/с$	%
1985	0.32	364	91/76
1986	0.37	360	92/79
1987	0.23	362	98/87
1988	0.22	395	97/82
1989	0.32	320	95/78
1990	0.21	331	98/70
1991	0.28	357	94/85
1992	0.29	327	96/83
1993	0.27	364	92/88
1994	0.24	389	98/91
1995	0.28	391	97/85
Период 1985—1995	0.26	364	95/82

Эффективность метода прогноза расчитывается по уравнению:

$$E = S/s = SQRT\ [\ S(Q_f - Q_r)^2\ /\ S(Q_f - Q_{sr})^2\ ] \qquad (11)$$

где Q_f — измеренное значение расхода воды,
Q_r — расчитанное значчение расхода воды,
Q_{sr} — среднее значение расхода воды за период наблюдений.

Допустимая погрешность :

$$D_{доп} = 0.674\ s\ [m/c] \qquad (12)$$

Оправдываемость—отношение количества оправдавшихся прогнозов к общему числу прогнозов выраженное в процентах. Процент оправдавшихся прогнозов по методике Juemou W., (стандарты Всемирной

метеорологической организации)/процент оправдавшихся прогнозов с 10% отклонением от фактического расхода.

На рис. 5 в качестве примера приведен совмещенный гидрограф расчетных и измеренных ежедневных расходов воды в створе Дарганата. Заметна хорошая сходимость обоих гидрографов, особенно при прохождении больших паводков.

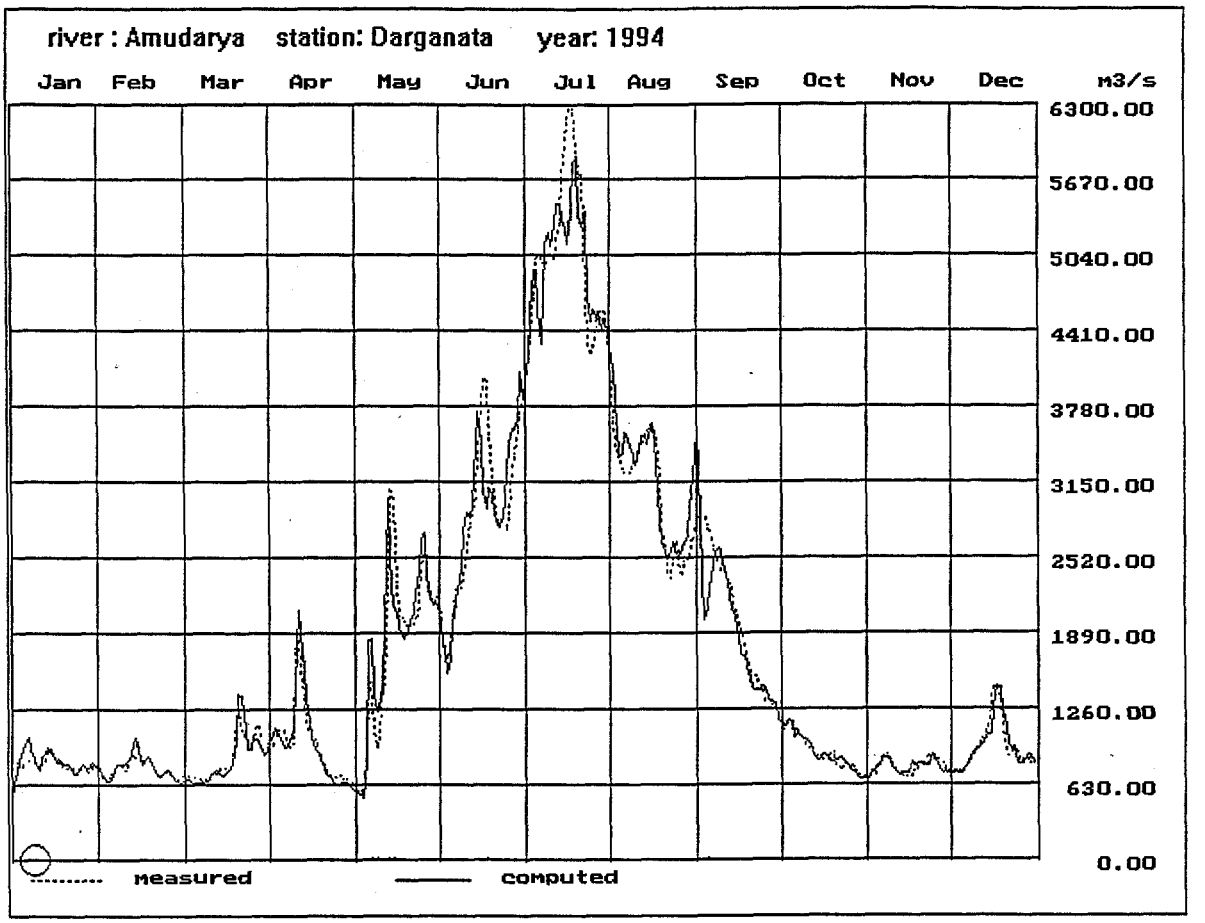


Рис. 5 Прогнозный и измеренный ежедневные расходы воды в створе Дарганата за 1994 год.

Таким образом расчетная схема и метод прогноза стока Амударьи могут применятся в оперативной практике и служить для исследований водного режима других рек, например Сырдарьи.

При разработке водоохранных мероприятий в бассейне Амударьи рекомендуется использовать предлагаемую гидрологическую модель для аппробации новых методов и природохранных технологий для выявления их слабых сторон. Используя расчетную схему возможно расчитать процесс трансформации загрязняющих веществ по длине реки Амударьи с

учетом водозаборов и сбросов коллекторно—дренажных вод на отдельных участках. Возможно также провести контроль за измерениями путем сопоставления расчетных и измеренных величин в заданный момент времени.

В процессе работы была создана база данных по стоку Амударьи на магнитных носителях. Проведена оценка невязок водного баланса на участке Керки—Дарганата, с использованием модельных расчетов, по которой можно определить среднегодовые потери стока не учитываемые измерениями.

Раздел 3

Рекомендации

3.1 Рекомендации по использованию результатов проекта

Данную гидрологическую модель и комплекс программ возможно использовать для научных исследований относительно моделирования трансформации паводка по реке в водохозяйственных организациях. Ниже приведены возможные научно—практические применения разработанного проекта и некоторые рекомендации по применению.

3.1.1 Для разработки методов прогноза в других бассейнах

Ввести исходные данные в базу данных для другого бассейна реки. Адаптировать параметры модели к бассейну реки. Провести анализ на соответствие расчетных и фактических значений расходов воды. При удовлетворительных критериях оценки и допустимой заблаговременности использовать данный комплекс.

3.1.2 Для моделирования оптимального водопотребления

Часто для оптимизации водопотребления необходимо расчитать режим попусков из водохранилища. В этом случае модель позволяет расчитывать трансформацию паводка по длине реки с учетом рассредоточенного водопотребления. Для этого река представляется в виде отдельных участков произвольной длины, таким образом, чтобы на одном участке был один пункт водозабора. Если пункты водозаборов расположены на близком расстоянии, тогда их можно объединить в один. Количество представляемых участков должен определить эксперт гидролог по гидрологическим условиям реки, так как гидрологические параметры участка принимаются одинаковыми для всего участка. При этом должно учитываться, что длина участка определяет шаг расчетного времени, то есть чем меньше длина участка, тем больше затраты расчетного времени.

3.1.3 Для расчета руслового баланса

Для расчета руслового баланса применяют методы с использованием декадных или месячных интервалов времени. В этом случае ошибка балансового уравнения зависит от динамики речного потока. Для времени добегания одни сутки ошибка для декадных значений составит 10%, для среднемесячных— 0.03% , при времени добегания более 3 суток расчетная ошибка составит 30 % и 10 % соответственно.

При использовании модели возможно снизить расчетную ошибку, так как время добегания учитывается. Для этого необходимо получить расчетный гидрограф и сравнить его с измеренным. Пульсационные разности необходимо сгладить и по ним получить расчетный режим невязок. Пульсационные разности зависят от точности измерений.

На рис. 6 представлен расчетный гидрограф невязок водного баланса на участке Керки—Дарганата за период 1991—1995 годы. В балансовом уравнении были учтены водозабор на орошение, сброс коллекторно—дренажных вод, испарение с водной поверхности. Заметим, что пульсационные разности более всего наблюдаются в периоды резких паводковых скачков.

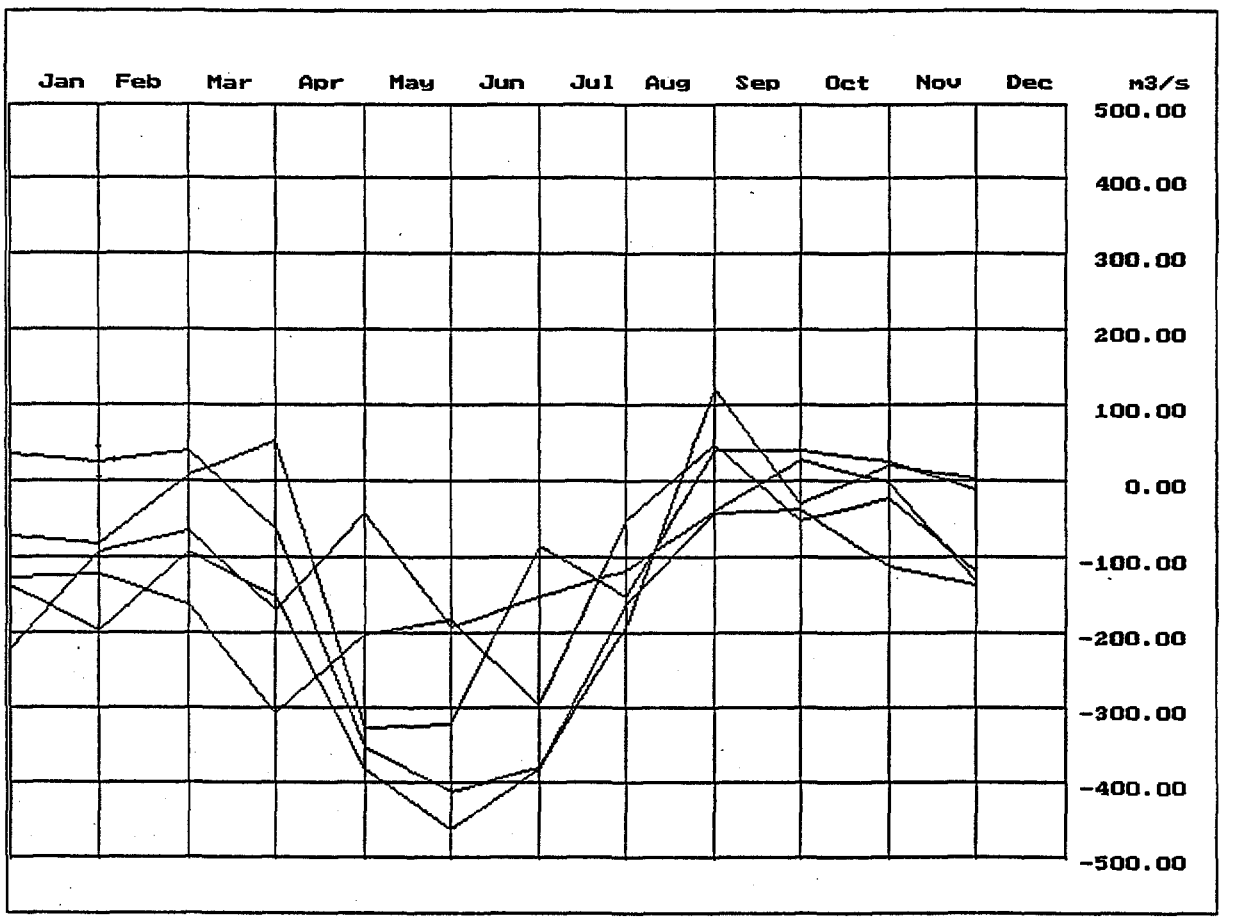


Рис. 6 График невязок водного баланса на участке Керки—Дарганата. Построен с использованием модельных расчетов.

3.1.4 Для моделирования транспорта загрязняющих веществ

Для приближенного расчета транспорта растворенных в воде веществ можно использовать модель для расчета расходов воды по длине реки. Концентрацию растворенных веществ можно представить в виде отношения количества вещества к объему воды на данный момент времени.

Для более точного расчета переноса загрязняющих веществ необходимо включить в модель отдельный блок, который требует дополнительных исследований.

Во—первых, небходимо решение проблемы регулярности измерений концентрации загрязняющих веществ в створах реки, так как модель более динамична, чем интервалы времени между измерениями.

Во—вторых, это проблема взаимодействия веществ между собой в зависимости от их концентрации в воде.

В—третьих, проблема поступления загрязнений в притоках и определение источников загрязнений по длине реки.

3.1.5 Построение сетевой модели

В большинстве случаев бассейн реки представляет собой сеть потоков (реки и каналы), особенно в зоне использования стока. Например речная сеть в Ферганской долине, Чирчик—Ахангаранский бассейн, Дельта Амударьи в Приаралье и другие. В этом случае модель представляется в виде соединения участков рек и каналов. Где боковой приток на отдельном участке выражается в виде выходящего расхода с другого. Подобная система была представлена для Хорезмской области, Myagkov (1995), и показала хорошие результаты.

Существенной проблемой в этом случае является проблема недостатка первичной информации по отдельным участкам реки, то есть количества измеряющих расходы воды створов, как правило, недостаточно для детализированного расчета. В этом случае адаптация модели требует знаний эксперта гидролога для интерполяции данных для отдельных участков и проведения большого числа контрольных расчетов для выявления погрешностей и уточнения исходной информации.

3.2 Рекомендации политической направленности

Результаты Проекта рекомендуется использовать в водохозяйственных организациях для разработки методов оптимального водопотребления и проведения контрольной оценки водоохранных мероприятий. Например для

расчета водного баланса по длине реки с учетом требований водопотребителей регионального уровня. Для определения дефицита водных ресурсов в бассейне Амударьи.

3.3 Потенциальное влияние проекта

При эксплуатации гидрологической модели в оперативном режиме :

- улучшится режим эксплуатации Тюямуюнского гидроузла, что приведет к снижению непродуктивных потерь воды,
- усовершенствуется режим управления водными ресурсами в нижнем течении Амударьи.

При эксплуатации гидрологической модели в режиме расчета трансформации паводка: возможно разработать методы оптимального управления водными ресурсами в среднем течении Амударьи при имитации работы водозаборов в заданных условиях водопользования.

Гидрологическая модель и комплекс программ может послужить основой для разработки методов прогноза стока для реки Сырдарьи.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение А

Описание базы гидрологических данных

База данных представляет собой комплекс программ для персонального компьютера типа IBM с операционной системой **MS–DOS**. База данных снабжена системой "HELP–WINDOWS", что позволит пользователю реже обращаться к техническому описанию.

Назначение

База данных предназначена для хранения и первичного анализа гидрологической информации в привязке к створам реки за многолетний период с последующим использованием для разработки метода прогноза стока.

Функциональные возможности

1. Хранимые данные:

   - ежедневные расходы и уровни воды;
   - параметры измеренных расходов воды: дата, уровень, расход, площадь сечения потока, средняя и максимальная скорость потока, ширина, максимальная и средняя глубина, уклон водной поверхности;
   - параметры для проведения расчетов и прогноза.

2. Ввод и корректировка данных.

3. Перевод данных в формат ASCII и обратно (необходим для связи базы данных с другими системами, ASCII – American Standartd Code for Information Interchange, Американский стандартный код для информационного обмена).

4. Представление данных в виде гидрографов стока.

5. Определение статистических связей между гидрологическими параметрами.

6. Расчет средних декадных и средних месячных расходов и уровней воды.

7. Анализ соответственных расходов и уровней.

Структура базы данных

База данных состоит из файлов с данными и программ их обработки.

Описание файлов

- Имя файла состоит из индекса створа и расширения, которое является кодом хранимой информации. Файлы данных содержатся в директории RUNOFF.

- Индексы расширений следующие:

*.run	— данные о ежедневных расходах воды;
*.lev	— данные о ежедневных уровнях воды;
*.mea	— данные об измеренных расходах воды;
upper.dat	— данные по верхнему створу;
down.dat	— данные по нижнему створу.

- Файл состоит из заголовка и собственных данных.

- Структура заголовка длиной 178 байт представлена в виде описания струк — туры на языке "СИ":

```
struct STATION {
   char Indriv[9];   /* 9   код водного объекта          */
   char River[50];   /* 50  название реки                */
   char Indst[5];    /* 5   код станции                  */
   char Stvor[50];   /* 50  название станции             */
   float Distan;     /* 4   расстояние от устья          */
   float Sqvare;     /* 4   площадь бассейна             */
   float Zero;       /* 4   высота станции               */
   char Terry[50];   /* 50  название территории          */
   int KolZap;       /* 2   количество данных в файле    */
};
```

- Данные представляют собой последовательность чисел преобразованных в бинарный код, что значительно ускоряет обработку информации в сравнении с файлами типа *.DBF и *.TXT.

Описание структуры данных

- Для ежедневных расходов воды:

```
struct DISCHARGE {
   int Year;         /* год                              */
```

```
    float Q[366];     /* расходы, для високосного года          */
                      /* расход    Q[59] = -1.0                 */
};
```

- Для ежедневных уровней воды:

```
struct LEVEL {
    int Year;         /* год                                    */
    float Q[366];     /* уровни, для високосного года           */
                      /* уровень Q[59] = -1.0                   */
};
```

- Для параметров измеренных расходов воды:

```
struct DISCHARGE {
    int Year;         /* год                                    */
    int Month;            /* месяц                              */
    int Day;              /* день                           */
    float DataQ[10];  /*  0 - уровень                           */
                      /*  1 - расход                            */
                      /*  2 - площадь сечения                   */
                      /*  3 - средняя скорость                  */
                      /*  4 - максимальная скорость             */
                      /*  5 - ширина реки                       */
                      /*  6 - средняя глубина                   */
                      /*  7 - максимальная глубина              */
                      /*  8 - уклон водной поверхности          */
                      /*  9 - выравнивающие 4 байта         */
};
```

- Для параметров верхнего и нижнего створов:

```
struct DISHARGE {
    int Year;         /* год                                    */
    int Month;            /* месяц                              */
    int Day;              /* день                               */
    float DataQ[10];  /*  0 - уровень                           */
                      /*  1 - расход                            */
                      /*  2 - площадь сечения                   */
                      /*  3 - средняя скорость                  */
                      /*  4 - максимальная скорость             */
                      /*  5 - ширина реки                       */
                      /*  6 - средняя глубина                   */
                      /*  7 - расход =F(уровень)                */
                      /*  8 - начальный расход                  */
                      /*  9 - начальный уровень                 */
};
```

Описание программ обработки данных

Программы обработки данных написаны на языке "СИ". Назначение и связи программ базы данных приведены в виде блок схемы. Исходные тексты программ прилагаются на дискете.

Связи программ базы гидрологических данных:

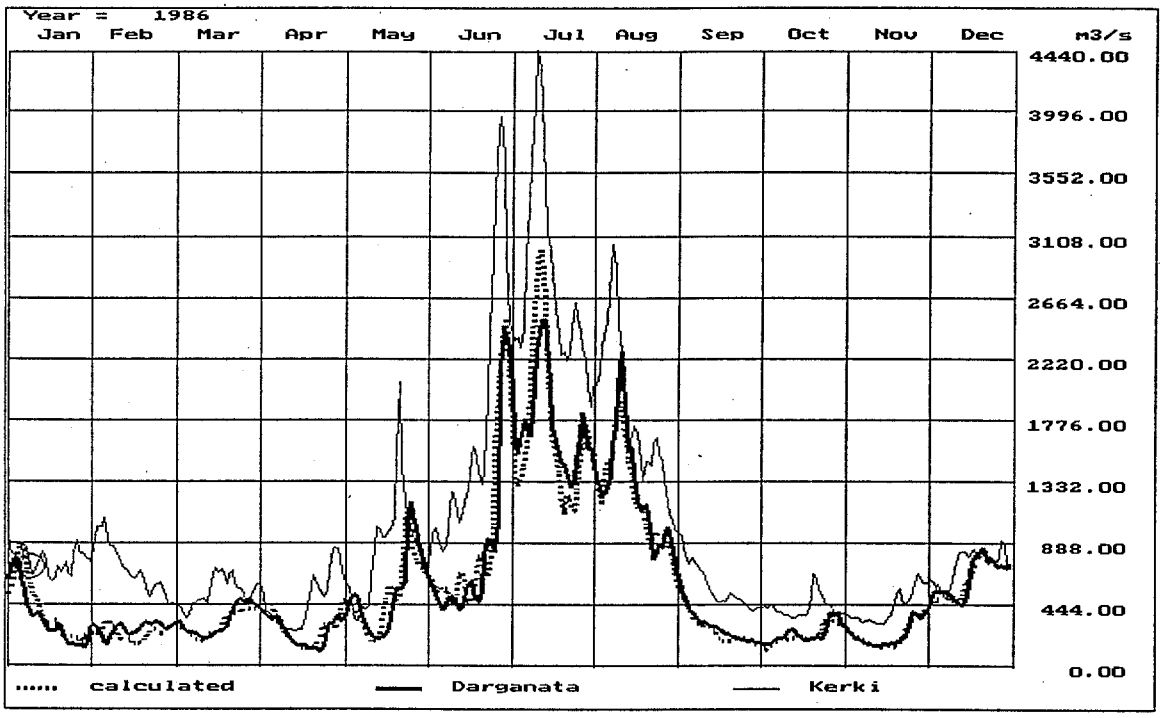
MAIN – модуль

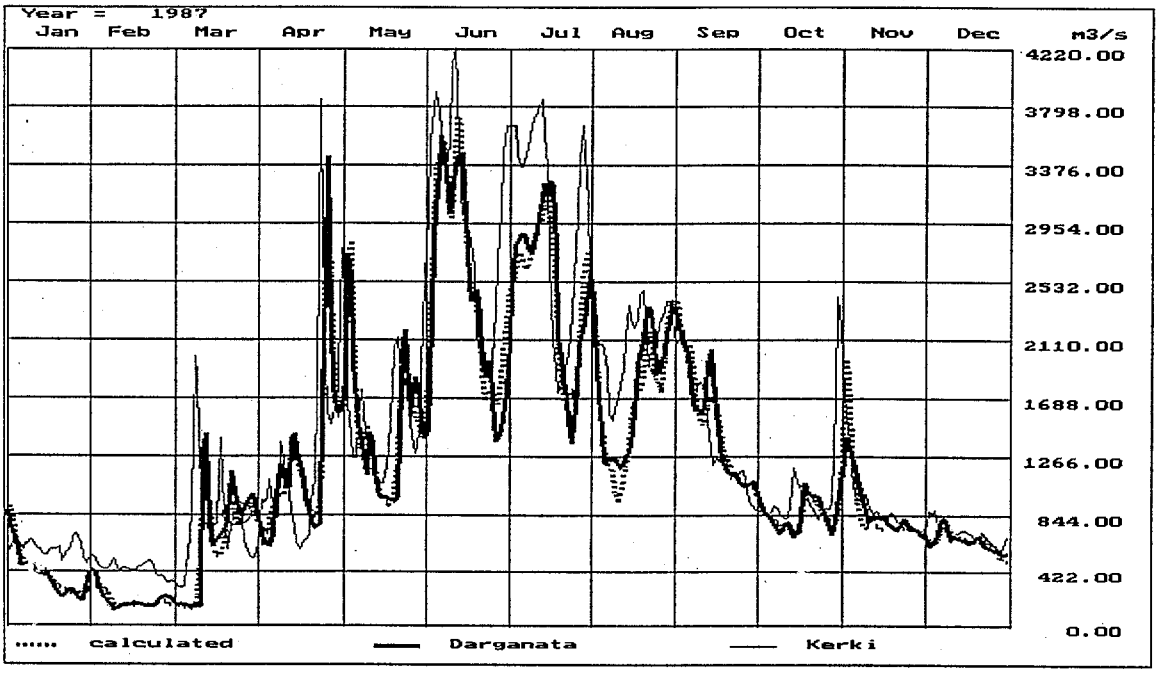
basa_d.exe	–	discharge.exe	–	runoff\ind_0001.run
basa_m.exe	–	measure.exe	–	runoff\ind_0001.mea
basa_l.exe	–	level.exe	–	runoff\ind_0001.lev

Ниже приведены некоторые образы экрана и образцы выдаваемых в выходной файл таблиц. Выдаваемые таблицы возможно просмотреть на экране компьютера и распечатать на принтере. Форма таблиц использует формат принятый для системы HYDATA.

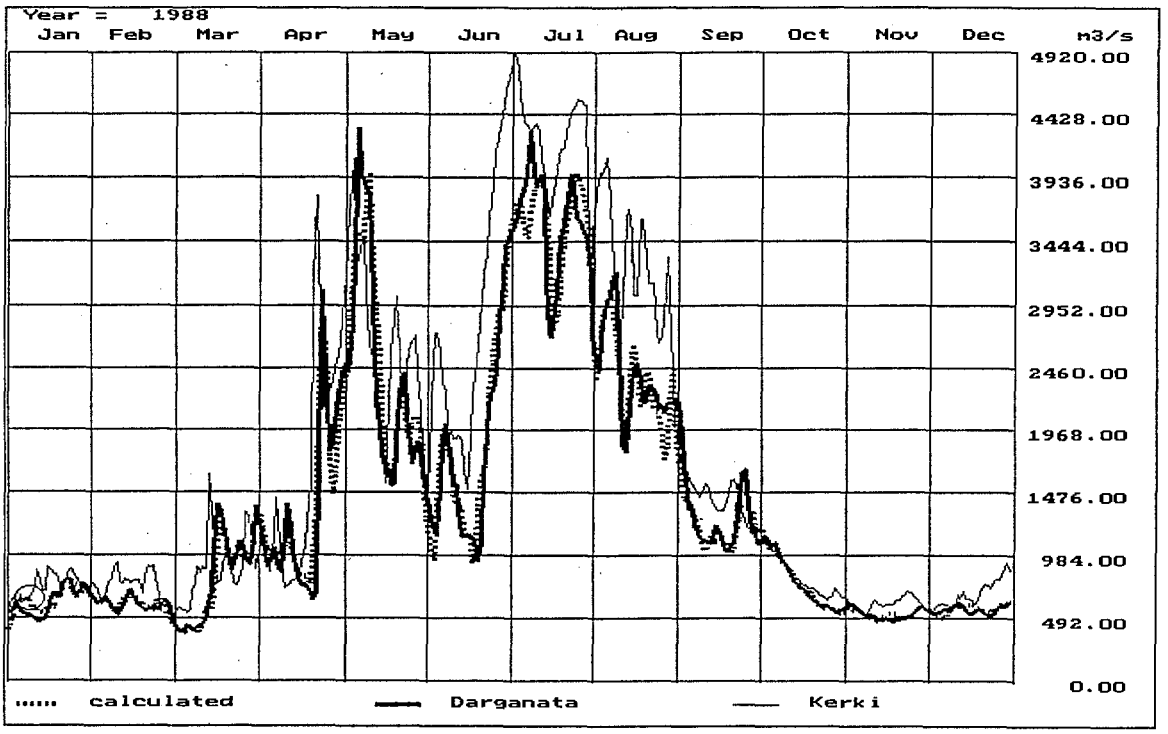
Приложение В

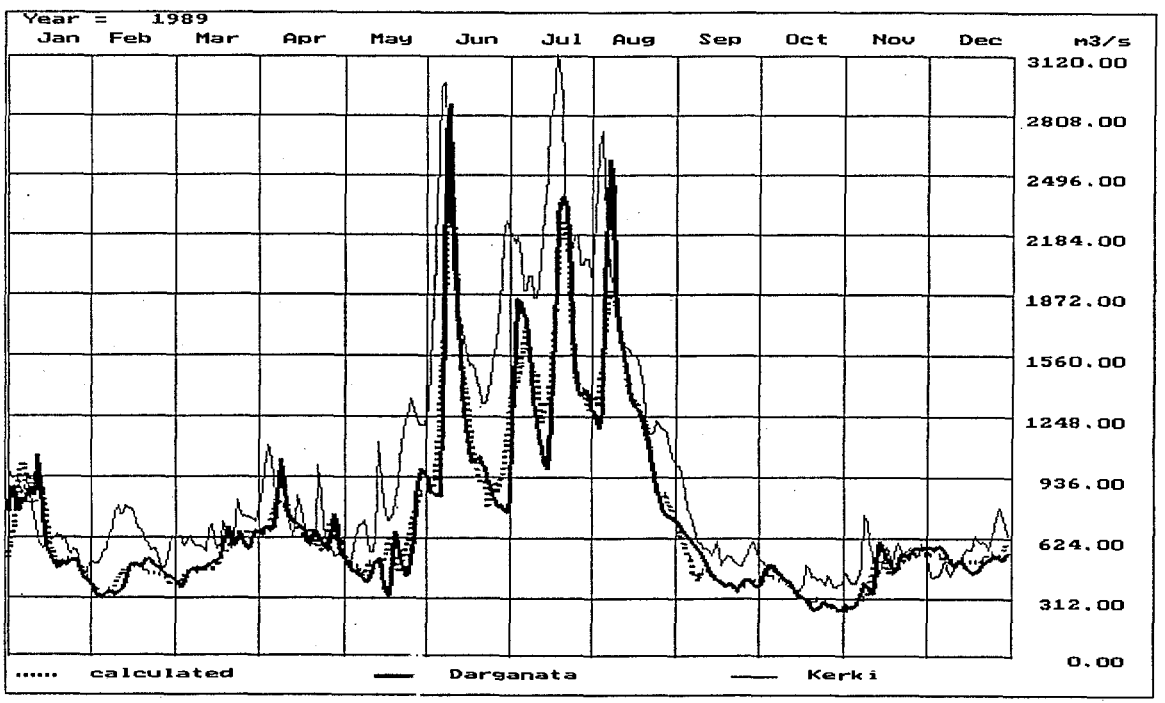
Совмещенные графики ежедневных расходов воды Амударьи

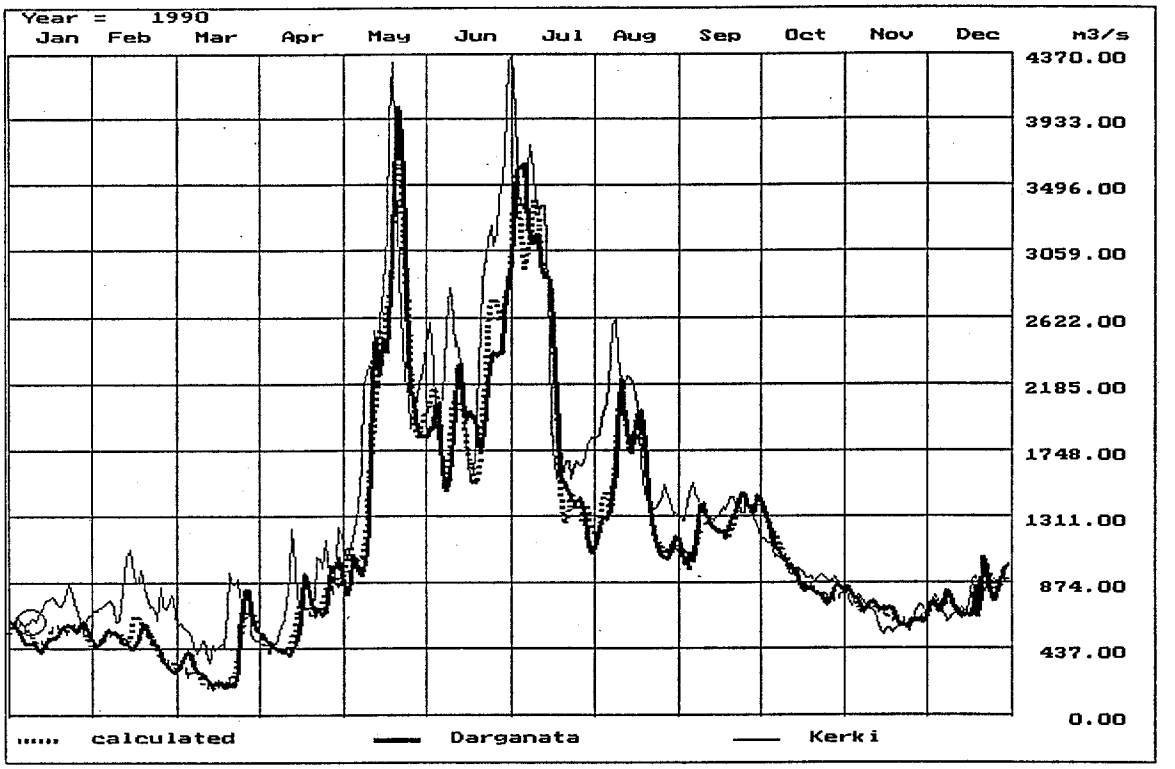


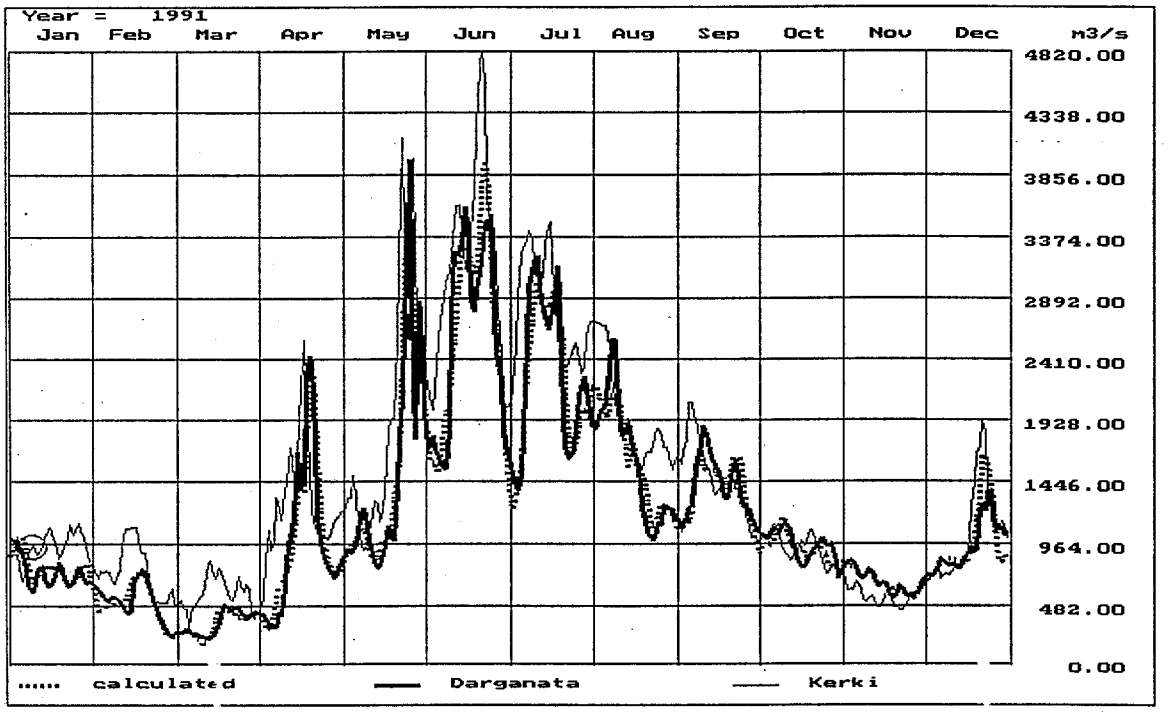


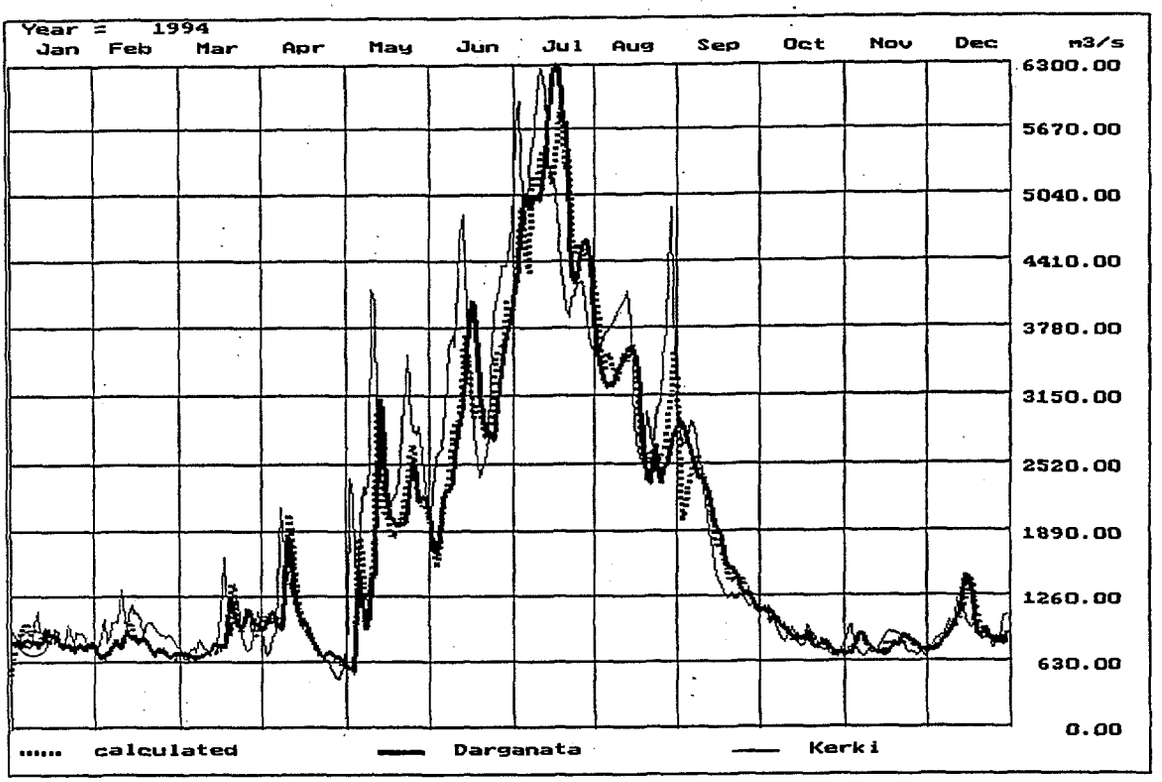
49

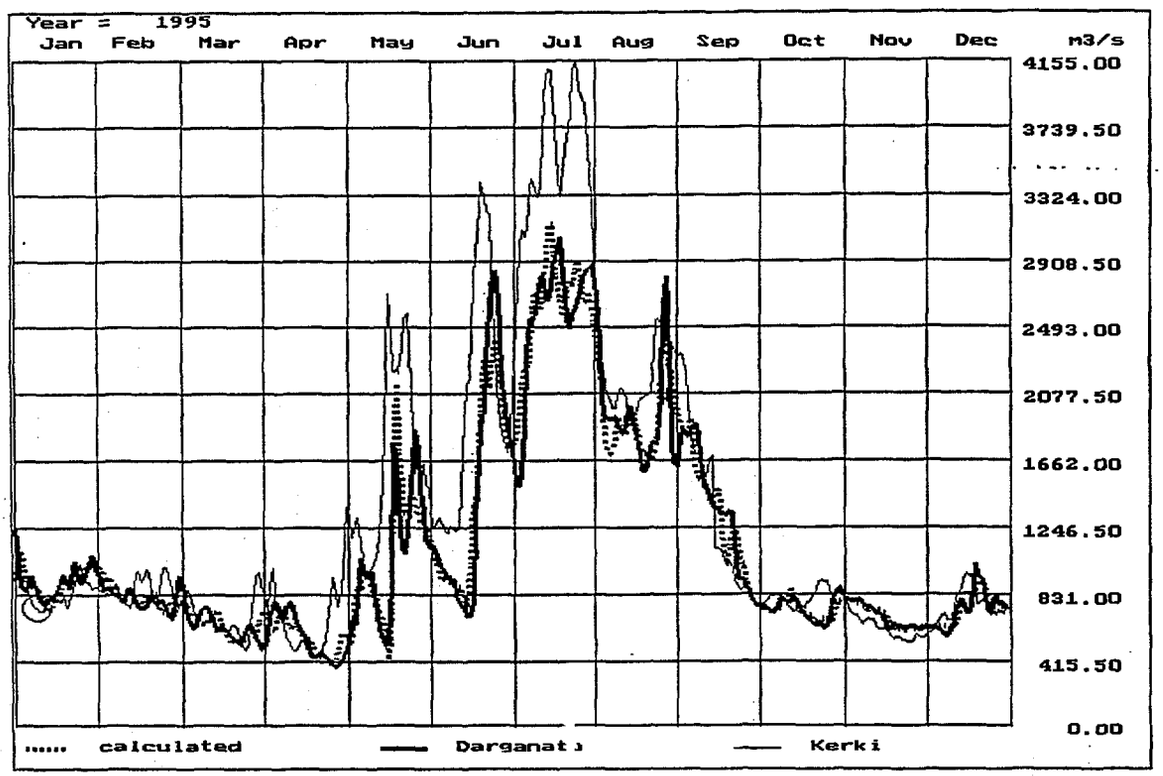

Year = 1988
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
m3/s
4920.00
4428.00
3936.00
3444.00
2952.00
2460.00
1968.00
1476.00
984.00
492.00
0.00
calculated
Darganata
Kerki

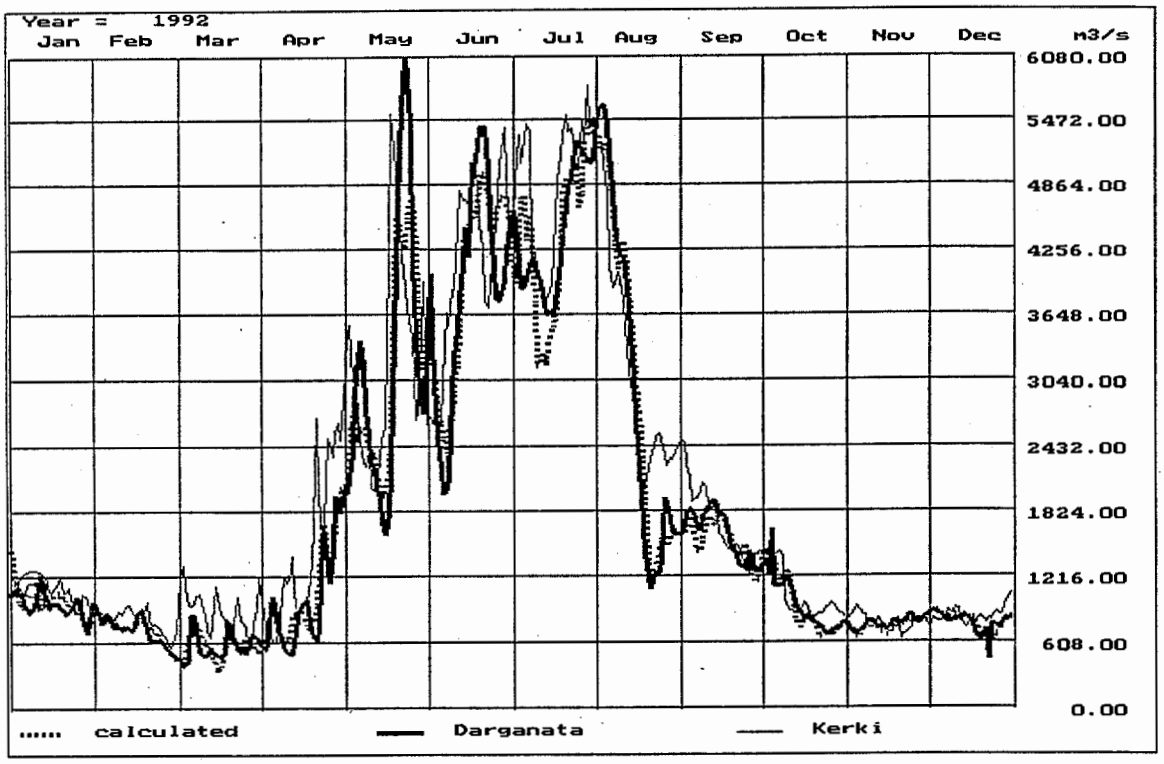

Year = 1989
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
m3/s
3120.00
2808.00
2496.00
2184.00
1872.00
1560.00
1248.00
936.00
624.00
312.00
0.00
calculated
Darganata
Kerki

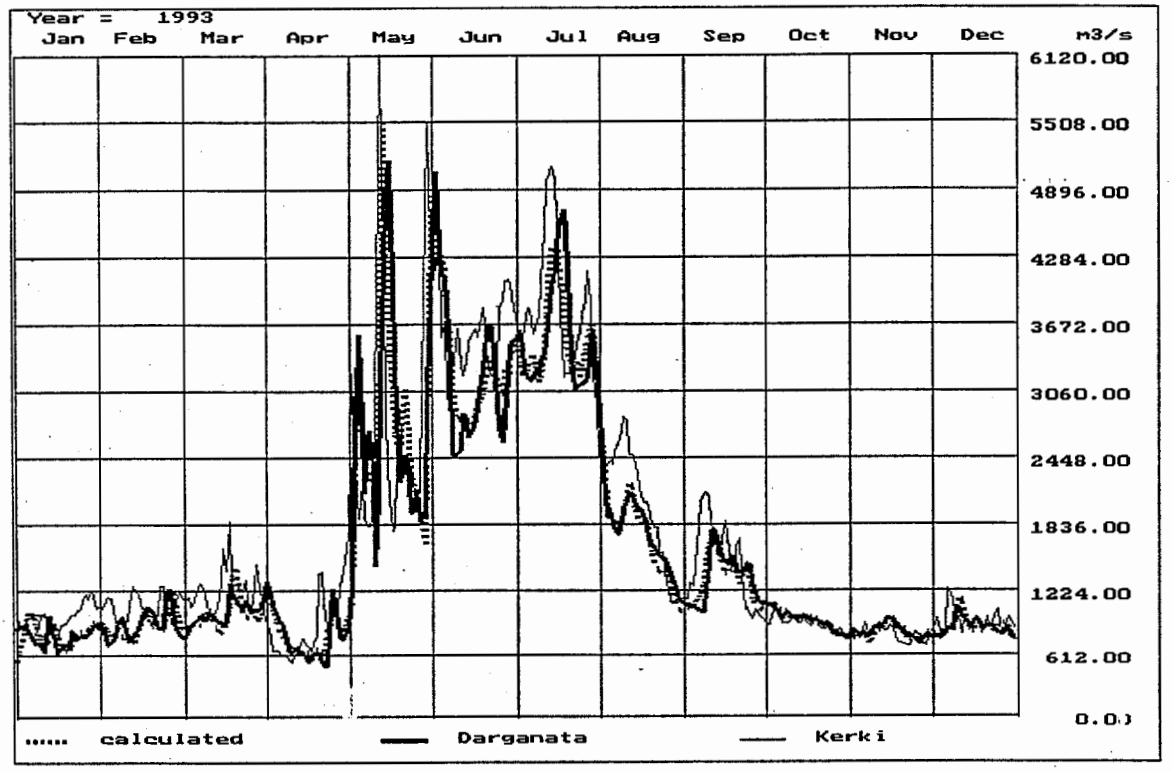

Year = 1990
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
m3/s
4370.00
3933.00
3496.00
3059.00
2622.00
2185.00
1748.00
1311.00
874.00
437.00
0.00
calculated
Darganata
Kerki


Year = 1991
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
m3/s
4820.00
4338.00
3856.00
3374.00
2892.00
2410.00
1928.00
1446.00
964.00
482.00
0.00
calculated
Darganata
Kerki


Year = 1994
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
m3/s
6300.00
5670.00
5040.00
4410.00
3780.00
3150.00
2520.00
1890.00
1260.00
630.00
0.00
calculated
Darganata
Kerki


Year = 1995
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
m3/s
4155.00
3739.50
3324.00
2908.50
2493.00
2077.50
1662.00
1246.50
831.00
415.50
0.00
calculated
Darganata
Kerki


Year = 1992
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
m3/s
6080.00
5472.00
4864.00
4256.00
3648.00
3040.00
2432.00
1824.00
1216.00
608.00
0.00
calculated
Darganata
Kerki


Year = 1993
Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec
m3/s
6120.00
5508.00
4896.00
4284.00
3672.00
3060.00
2448.00
1836.00
1224.00
612.00
0.00
calculated
Darganata
Kerki

53

Приложение С
Инструкция для пользователя программ

Программа расчета трансформации паводка и переноса растворенной компоненты по реке с деформируемым руслом.

Предназначена для расчета по имеющимся у пользователя исходным данным гидрографов воды и минерализации по контрольным створам реки на основе математической модели переноса влаги и солей по стволу реки (одномерное представление "резервуарной модели").

В качестве уравнения движения используется зависимость измеренных расходов воды от площади поперечного сечения потока вида:

$$Q = a * A * A + b * A$$

где Q — расход воды;
A — площадь поперечного сечения потока;
a, b — коэффициенты зависимости.

Программа реализована на алгоритмическом языке "Си" для Персонального компьютера типа PC/XT/AT. Выполняемый модуль: "rivmod.exe" занимает 43.776 Kb дисковой памяти. Результаты работы программы пошагово отображаются на экране дисплея и выводятся в текстовый файл (типа ASCII), просматриваемый любым текстовым редактором.

Проведение расчетов

Запуск программы на выполнение производится посредством файла с расширением " *.bat " с указанием выполняемого модуля "rivmod.exe" и имен используемых файлов.

- Пример "rivmod.bat " файла:

rivmod.exe — выполняемый модуль;
coeff.dat — файл коэффициентов;
hydro.dat — файл гидрографов;
result.dat — файл результатов расчета.

Структура заполнения файлов исходных данных

Файл коэффициентов содержит:

int N — количество участков,

54

по каждому участку:

int	nom	[N]	—номер участка,
float	L	[N]	—длина участка в метрах,
float	a	[N]	—коэффициент зависимости,
float	b	[N]	—коэффициент зависимости,
float	Qo	[N]	—начальное значение расхода воды,
float	Co	[N]	—начальное значение минерализации воды.

- Пример:

```
4
1     150000.  0.0004  0.520   3100.   0.6
2     170000.  0.0004  0.520   3100.   0.6
3      40000.  0.0004  0.520   3100.   0.6
4      15000.  0.0004  0.520   3100.   0.6
```

Файл гидрографов содержит :

int	KOL	—количество членов гидрологического ряда,
float	tau	—шаг по времени между членами ряда (сек),
float	Qv	—расход воды в начальном створе (м3/сек),
float	Cv	—минерализация воды в начальном створе (г/л),
float	Qp [N]	—приток на участок (м3/сек),
float	Cp [N]	—минерализация притока (г/л),
float	V [N]	—водозабор (м3/сек).

- Пример:

```
7    3600.
43.  2. 10. 1.2  10. 15. 10. 1. 10. 1.   10. 10. 10. 10.
42.  3. 10. 1.3  10. 15. 10. 1. 10. 1.   10. 10. 10. 10.
45.  4. 10. 1.4  10. 15. 10. 1. 10. 1.   10. 10. 10. 10.
46.  1. 10. 1.2  10. 15. 10. 1. 10. 1.   10. 10. 10. 10.
48.  2. 10. 1.1  10. 15. 10. 1. 10. 1.   10. 10. 10. 10.
44.  1. 10. 1.2  10. 15. 10. 1. 10. 1.   10. 10. 10. 10.
71.  2. 10. 1.3  10. 15. 10. 1. 10. 1.   10. 10. 10. 10.
```

При водозаборе превышающем суммарный приход воды на участок возникает аварийная остановка расчета с сообщением в выходной файл и на экран дисплея: "водозабор превышает суммарный приток на участок".

Файл результатов расчета содержит:

1. Ориентировочную запись.
2. Ориентировочную строку.

3. Расчетные гидрографы воды и минерализации по участкам.

- Пример результат расчета :

Qвых[1]	C[1]	Qвых[2]	C[2]	Qвых[3]	C[3]	Qвых[4]	C[4]
2939.55	0.60	3096.52	0.60	3100.01	0.60	3100.01	0.60
2791.12	0.61	3085.94	0.61	3098.79	0.61	3100.01	0.61
2653.74	0.61	3069.16	0.61	3095.21	0.61	3099.07	0.61
2526.24	0.61	3047.01	0.61	3088.65	0.61	3096.33	0.61
2407.75	0.62	3020.26	0.62	3078.77	0.62	3091.21	0.62
2297.18	0.62	2989.53	0.62	3065.38	0.62	3083.28	0.62
2195.22	0.62	2955.46	0.62	3048.50	0.62	3072.27	0.62

. . . конец расчета . . .

Приложение D
Список литературы

1. **Денисов Ю. М.,Сергеев А. И.**
Разработать метод расчета переноса воды и загрязняющих веществ в открытых руслах (1989).

2. **Зубков Н.С.**
Некоторые особенности гидравлического режима Амударьи (1976) .

3. **Розенберг Л. И., Грушевский М. С.**
Возможности расчета распластывания волн половодья в реках с деформируемым руслом (на примере Амударьи)(1972).Тр.ГГИ,Вып.190.

4. **Абальян Т.С.**
Прогноз стока Амударьи (1954). Тр.ЦИП. Вып. 059.

5. **Савельева А.В.**
Русловой водный баланс среднего течения Амударьи (1976). Тр.ГГИ,Вып.234.

6. **Карасев И.Ф.**
Точность гидрометрических данных и усовершенствование методов определения стока с неустойчивым руслом (1971). Тр.ГГИ, Вып.185.

7. **Шульц В. Л.**
Реки Средней Азии (1965). Гидрометиздат.

8. **Рубинова Ф. Э.**
Изменение стока Амударьи под влиянием мелиораций в ее бассейне (1985). Тр.САНИГМИ, Вып. 234

9. **Ляховская Л. Ф., Салихова Д. Х.**
Разработать метод краткосрочного прогноза Амударьи в створах постов Керки, Дарганата с заблаговременностью 10 суток (1990).

10. **Денисов Ю. М.,Мягков С.В.**
Математическое моделирование и современные методы гидрологических расчетов и прогнозов (1996). Тр.САНИГМИ

11. **Мягков С. В.**
Резкое ухудшение качества воды в р. Амударье под воздействием мелиораций (1986). Тр.САНИИРИ

12. **Мягков С. В., Соколов В. И.**
Особенности формирования дренажно – сбросных вод и методика их прогнозирования в бассейне реки (1986). Тр.САНИИРИ

13. **Мягков С.В.**
Математическая модель взаимосвязи поверхностных и грунтовых вод (1987). Тр.САНИИРИ

14. **Мягков С. В.**
Изменение качества оросительной воды по течению реки (1987).

15. **Мягков С. В.**
Моделирование процесса солепереноса по стволу Амударьи (1991). Тр.САНИИРИ

16. **Мягков С. В.**
Прогноз стока коллекторно—дренажных вод в бассейне Амударьи (1995). Тр.САНИГМИ

17. **Мягков С. В., Касьянова Н. В.**
Расчет боковой приточности в бассейне Амударьи (1995). Тр.САНИИРИ

18. **Мягков С. В., Бараев А. А.**
Водно—солевой режим реки Амударьи в нижнем течении (1995). Тр.ТИИМСХ

19. **Мягков С. В.**
Река и компьютер. Газета "Правда востока" Ташкент,22 марта 1996 г.

20. **Мягков С.В.**
Взгляд из космоса на пустыню. Газета "Правда востока" Ташкент, 18 июня 1996 г.

21. **Мягков С. В.**
Эта загадочная Амударья. Газета "Правда востока" Ташкент, 30 июля 1996 г.

22. **Myagkov S.**
A model of water—salt exchange between a river and groundwater (1995) Journal Hydrological Science Vol. 13, IAHS Publ. No. 229

23. Movement of salt and water in land and water systems (1994) HOMS COMPONENT,K55.2.05(Apr94), WMO publ.

24. **Juemou W.**
Methods for verification of hydrological forecasts (1994). WMO/TD —No 617

25. **Tilrem O. A.**
Level and discharge measurements under difficult conditions (1986). WMO—No 650