

# ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

„МЕТОДЫ ДОЛГОСРОЧНЫХ И КРАТКОСРОЧНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОГНОЗОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СУДОХОДСТВА НА ДУНАЕ”

ДУНАЙСКАЯ КОМИССИЯ  
Будапешт, 1991

# **ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК**

**„МЕТОДЫ ДОЛГОСРОЧНЫХ И КРАТКОСРОЧНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОГНОЗОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СУДОХОДСТВА НА ДУНАЕ”**

**ДУНАЙСКАЯ КОМИССИЯ  
Будапешт, 1991**

ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

"Методы долгосрочных и краткосрочных гидрологических  
прогнозов для целей судоходства на Дунае"

## 1. Аннотация

Значение гидрологических прогнозов и их использование для целей судоходства на Дунае является общеизвестным. Однако желательно подчеркнуть значение краткосрочных прогнозов уровней, расходов воды и ледовых явлений, учитывая их влияние на возможность более эффективного использования дунайского флота при перевозке грузов, особенно на длинные расстояния.

С целью улучшения условий навигации на Дунае Дунайская Комиссия приняла решение разработать на основе полученных материалов от придунайских стран "Информационный сборник" с целью обмена опытом и тем самым способствовать применению более надежных методов гидрологических прогнозов для целей судоходства на Дунае.

2. Оглавление

|   |    |
|---|----|
| 1. Аннотация .....  | 1  |
| 2. Оглавление .....   | 2  |
| 3. Введение .....   | 7  |
| 4. Методы гидрологических прогнозов по Дунаю, используемых в придунайских странах ..... | 8  |
| 4.1. <u>Прогнозы уровней воды</u> .....   | 8  |
| 4.1.1. <u>Методы долгосрочных прогнозов уровней воды Дуная</u> .....                    | 8  |
| 4.1.1.1. в Федеративной Республике Германии   | 8  |
| 4.1.1.2. в Австрийской Республике .....   | 8  |
| 4.1.1.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике .....                            | 9  |
| 4.1.1.4. в Венгерской Республике .....  | 22 |
| 4.1.1.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии .....                     | 22 |
| 4.1.1.6. в Республике Болгарии .....  | 22 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1.1.7. в Румынии .....  | 29 |
| 4.1.1.8. в Союзе Советских Социалистических<br>Республик .....            | 29 |
| 4.1.2. <u>Методы краткосрочных прогнозов уровней<br/>воды Дуная</u> ..... | 38 |
| 4.1.2.1. в Федеративной Республике Германии ..                            | 38 |
| 4.1.2.2. в Австрийской Республике .....                                   | 39 |
| 4.1.2.3. в Чешской и Словацкой Федеративной<br>Республике .....           | 41 |
| 4.1.2.4. в Венгерской Республике .....                                    | 41 |
| 4.1.2.5. в Социалистической Федеративной Рес-<br>публике Югославии .....  | 41 |
| 4.1.2.6. в Республике Болгарии .....                                      | 57 |
| 4.1.2.7. в Румынии .....  | 60 |
| 4.1.2.8. в Союзе Советских Социалистических<br>Республик .....            | 60 |
| 4.2. <u>Прогнозы расходов воды</u> .....                                  | 60 |
| 4.2.1. <u>Методы долгосрочных прогнозов расходов<br/>воды Дуная</u> ..... | 60 |
| 4.2.1.1. в Федеративной Республике Германии ..                            | 60 |

|  | Стр.   |
|--|--------|
| 4.2.1.2. в Австрийской Республике .....  | 60     |
| 4.2.1.3. в Чешской и Словацкой Федеративной<br>Республике .....                | 60     |
| 4.2.1.4. в Венгерской Республике .....   | 61     |
| 4.2.1.5. в Социалистической Федеративной<br>Республике Югославии .....         | 65     |
| 4.2.1.6. в Республике Болгарии .....   | 65     |
| 4.2.1.7. в Румынии .....   | 65     |
| 4.2.1.8. в Союзе Советских Социалистических<br>Республик .....                 | 78     |
| <br>4.2.2. <u>Методы краткосрочных прогнозов расходов<br/>воды Дуная</u> ..... | <br>78 |
| 4.2.2.1. в Федеративной Республике Германии                                    | 78     |
| 4.2.2.2. в Австрийской Республике .....  | 78     |
| 4.2.2.3. в Чешской и Словацкой Федеративной<br>Республике .....                | 78     |
| 4.2.2.4. в Венгерской Республике .....   | 79     |
| 4.2.2.5. в Социалистической Федеративной<br>Республике Югославии .....         | 79     |
| 4.2.2.6. в Республике Болгарии .....   | 79     |
| 4.2.2.7. в Румынии .....   | 79     |
| 4.2.2.8. в Союзе Советских Социалистических<br>Республик .....                 | 97     |

|  | Стр. |
|--|------|
| 4.3. <u>Прогнозы ледового режима</u> .....                                 | 97   |
| 4.3.1. <u>Методы долгосрочного прогноза появления льда на Дунае</u> .....  | 97   |
| 4.3.1.1. в Федеративной Республике Германии                                | 97   |
| 4.3.1.2. в Австрийской Республике .....                                    | 97   |
| 4.3.1.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике .....               | 97   |
| 4.3.1.4. в Венгерской Республике .....                                     | 97   |
| 4.3.1.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии .....        | 108  |
| 4.3.1.6. в Республике Болгарии .....                                       | 108  |
| 4.3.1.7. в Румынии .....   | 108  |
| 4.3.1.8. в Союзе Советских Социалистических Республик .....                | 131  |
| 4.3.2. <u>Методы краткосрочных прогнозов появления льда на Дунае</u> ..... | 150  |
| 4.3.2.1. в Федеративной Республике Германии .....                          | 150  |
| 4.3.2.2. в Австрийской Республике .....                                    | 150  |
| 4.3.2.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике .....               | 150  |
| 4.3.2.4. в Венгерской Республике .....                                     | 150  |
| 4.3.2.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии .....        | 150  |
| 4.3.2.6. в Республике Болгарии .....                                       | 150  |
| 4.3.2.7. в Румынии .....   | 150  |
| 4.3.2.8. в Союзе Советских Социалистических Республик .....                | 150  |



|  | Стр. |
|--|------|
| 4.3.3. <u>Методы долгосрочного прогноза вскрытия льда на Дунае</u> .....           | 160  |
| 4.3.3.1. в Федеративной Республике Германии  | 160  |
| 4.3.3.2. в Австрийской Республике .....  | 160  |
| 4.3.3.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике .....                       | 160  |
| 4.3.3.4. в Венгерской Республике .....   | 160  |
| 4.3.3.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии .....                | 160  |
| 4.3.3.6. в Республике Болгарии .....   | 160  |
| 4.3.3.7. в Румынии .....   | 160  |
| 4.3.3.8. в Союзе Советских Социалистических Республик .....                        | 166  |
| 4.3.4. <u>Методы краткосрочного прогноза установления ледостава на Дунае</u> ..... | 174  |
| 4.3.4.1. в Федеративной Республике Германии  | 174  |
| 4.3.4.2. в Австрийской Республике .....  | 174  |
| 4.3.4.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике .....                       | 175  |
| 4.3.4.4. в Венгерской Республике .....   | 175  |
| 4.3.4.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии .....                | 175  |
| 4.3.4.6. в Республике Болгарии .....   | 175  |
| 4.3.4.7. в Румынии .....   | 175  |
| 4.3.4.8. в Союзе Советских Социалистических Республик .....                        | 191  |

### 3. Введение

Информационный сборник "Методы долгосрочных и краткосрочных гидрологических прогнозов для целей судоходства на Дунае" составлен в соответствии с Планом работы Дунайской Комиссии на 1989/1990 гг. и 1990/1991 гг.

Для составления Информационного сборника послужили авторские материалы, полученные от компетентных гидрологических организаций и институтов Австрии, Болгарии, Венгрии, Германии, Румынии, Советского Союза, Чехословакии и Югославии.

Информационный сборник составлен в соответствии с пунктом "h" статьи 8 раздела I главы II Конвенции о режиме судоходства на Дунае.

Макет указанного Информационного сборника принят решением Сорок шестой сессии Дунайской Комиссии (ДК/СЕС 46/15). Материалы содержат в развернутом виде опыт придунайских стран и представляют интерес для судоходства. В них учтены застройка судоходного фарватера р. Дунай в процессе регуляционных работ на отдельных участках Дуная.

Надо заметить, что дальнейшее развитие использованных прогнозов зависит от будущих гидротехнических работ на Дунае.

Материалы придунайских стран показывают, что морфологические, гидрологические и климатические различия проявляются в различных данных и методах.

Учитывая специфику различных участков Дуная, предлагается использовать эти методы применительно к отдельным участкам реки.

Информационный сборник одобрен Сорок девятой сессией (док. ДК/СЕС 49/14).

#### 4. Методы гидрологических прогнозов на Дунае, используемые в придунайских странах

В этот раздел включены материалы, полученные от Австрии, Болгарии, Венгрии, Германии, Румынии, Советского Союза, Чехословакии и Югославии. Материалы являются весьма разнообразными и не полностью отвечают принципам принятого Макета, а также не указывают, для каких конкретно участков были использованы эти методы гидрологических прогнозов. В большинстве материалов не имеется сведений о том, с какой заблаговременностью и с какой точностью выпускаются прогнозы по данным методам.

Полученные материалы, в основном, являются статьями отдельных авторов или институтов и в результате этого не соответствуют принятому Макету. Однако, не имея других материалов от стран, текст этих статей помещен в Информационный сборник в том виде, в каком они получены, с указанием фамилии автора или наименования института.

#### 4.1. Прогнозы уровней воды

##### 4.1.1. Методы долгосрочных прогнозов уровней воды Дуная

###### 4.1.1.1. в Федеративной Республике Германии.

Прогнозы на более длительный срок не устанавливаются.

См. пункт 4.1.2.1.

###### 4.1.1.2. в Австрийской Республике.

Явно, что быстрое прохождение явлений, связанное с расходами воды на Дунае, а также на его основных притоках в Австрии,

истоки которых находятся в Альпах (реки Инн, Зальцах, Траун, Энс), позволяет составлять только краткосрочные гидрологические прогнозы. Кроме того, метеорологические условия и режим расхода воды на верхнем участке Дуная подвергаются многочисленным влияниям Атлантического океана и Средиземного моря, в результате чего они отличаются быстрыми и непредвиденными колебаниями. По этим причинам в Австрии не составляются долгосрочные прогнозы уровней и расходов воды, а только краткосрочные прогнозы.

#### 4.1.1.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике.

##### Информация о методах краткосрочных и долгосрочных гидрологических прогнозов на Дунае для целей судоходства.

Оперативные гидрологические прогнозы на Дунае и остальных водотоках Словацкой Республики издаются в Словацком гидрометеорологическом институте (СГМИ) в отделе гидрологической информационной службы прогнозов (ГИПС). Внимание сосредоточено, главным образом, на краткосрочных гидрологических прогнозах, принцип и содержание которых даётся в сжатой форме в приведённой ниже части информации.

Долгосрочные прогнозы на Дунае СГМИ не издаёт.

#### А. Створы прогноза и сбор информации.

В настоящее время ГИПС ежедневно издаёт прогнозы для 5 прогнозных створов на чехословацком участке Дуная: Братислава, Габчиково, Медведев, Комарно, Штурово. 24-часовые прогнозы для Габчиково начали регулярно издаваться с 1.3.1985 г. Сбор данных с чехословацкого участка Дуная и его притоков проводится по телефону. С

некоторых постов осуществляется дистанционная передача данных об уровне воды.

Данные с немецкого и австрийского участков Дуная и главных притоков передаются по телефону австрийской гидрологической службой в Вене (таблица № 1). Кроме уровней воды, измеренных в определенные сроки, передаются данные о расходах, присоединенных к данным утренних уровней воды, на постах Ибс, Киншток и Вена, и прогноз уровня воды для Вены на следующий день. При значительных изменениях уровня воды или наводнениях заблаговременность прогноза для Вены сокращается до 6 часов.

Таблица 1

| Пост                   | Водоток        | Предшествующий день |      |      | Текущий день<br>6/7ч |
|------------------------|----------------|---------------------|------|------|----------------------|
|                        |                | 14/15 ч             | 19 ч | 23 ч |                      |
| Швабельвейс            | Дунай          |                     |      |      | Н                    |
| Хофкирхен              | Дунай          |                     |      |      | Н                    |
| Пассау                 | Дунай          |                     |      |      | Н                    |
| Зальцбург              | Зальцах        |                     |      |      | Н                    |
| Шердинг                | Инн            |                     |      |      | Н                    |
| Пассау                 | Инн            |                     |      |      | Н                    |
| Велс                   | Траун          |                     |      |      | Н                    |
| Штейр                  | Штейр          |                     |      |      | Н                    |
| Энгельхартс-<br>целль  | Дунай          |                     |      |      | Н                    |
| Линц                   | Дунай          |                     | Н    |      | Н                    |
| Маутхаузен             | Дунай          |                     |      |      | Н                    |
| Ибс                    | Дунай          | Н                   | Н    | Н    | Н/Q                  |
| Мельк                  | Дунай          |                     |      |      | Н                    |
| Киншток                | Дунай          | Н                   | Н    | Н    | Н/Q                  |
| Вена                   | Дунай          | Н                   | Н    | Н    | Н/Q/Н<br>пр.         |
| Хайнбург               | Дунай          |                     |      |      | Н                    |
| Вена Шведен-<br>брюкке | Дунай<br>канал |                     |      |      | Н                    |
| Опониц                 | Ибс            |                     |      |      | Н                    |
| Греимперсдорф          | Ибс            |                     |      |      | Н                    |
| Хогенау                | Морава         |                     |      |      | Н                    |
| Братислава             | Дунай          | Н/Q                 | Н/Q  | Н/Q  | Н/Q                  |
| Габчиково              | Дунай          | Н                   | Н    | Н    | Н                    |
| Медведёв               | Дунай          |                     | Н/Q  |      | Н/Q                  |
| Комарно                | Дунай          | Н/Q                 | Н/Q  |      | Н/Q                  |
| Штурово                | Дунай          | Н                   | Н    |      | Н                    |
| Моравски Ян            | Морава         |                     | Н/Q  |      | Н/Q                  |
| Загорска Вес           | Морава         |                     | Н/Q  |      | Н/Q                  |
| Шаля                   | Ваг            |                     |      |      | Н/Q                  |

### В. Время добегания и заблаговременность прогноза

Для различных участков время добегания представлено графически. Построение графических зависимостей между уровнем воды на верхнем посту и временем добегания между верхним и нижним постами проводится на основе разницы во времени между достигнутым паводочным максимальным уровнем воды на верхнем и нижнем постах.

В ГИПС используются кривые времени добегания для отдельных участков Дуная от Линца до Штурова. Для участка Вена-Братислава время добегания колеблется от 8 часов, при низких уровнях воды, до 24 часов, при высоких уровнях воды.

Наиболее высокорасположенным постом, который можно принимать во внимание, является Ибс. Время добегания на участке Ибс-Братислава колеблется между 18-40 часами.

Ежедневно ГИПС издает гидрологические прогнозы с заблаговременностью 1 дня для всех створов прогноза на Дунае. Если уровень воды в Братиславе понизится ниже 300 см, издается NIVGAR, т.е. 48-часовой прогноз для Братиславы и 72-часовой прогноз для Комарно.

Во время строительства гидроузла Габчиково-Надьмарош в целях его охраны каждую пятницу издается 48-часовой прогноз и тенденция на 72 час. для Братиславы.

Во время половодья заинтересованным лицам предоставляется информация о предполагаемом времени и высоте кульминационных уровней.

### С. Метод соответствующих изменений уровней воды

Метод основан на предположении существования простого соотношения между 24-часовым изменением уровня воды на двух постах:

$$H_{t+24}^D = H_t^D + \mathcal{L}(H_{t+24-\tau}^H - H_{t-\tau}^H)$$

- где  $H_{t+24}^D$  - прогнозируемый уровень воды на нижнем посту
- $H_t^D$  - фактический уровень воды на нижнем посту
- $H_T^H$  - уровень воды на верхнем посту в момент  $T$
- $\tau$  - время добегания между верхним и нижним постами
- $t$  - фактическое время
- $\mathcal{L}$  - коэффициент.

При прогнозах принимаются во внимание следующие участки:

| Участок                                   | Коэффициент                         |
|---|-------------------------------------|
| Вена-Братислава                           | $\mathcal{L} = 1$                   |
| Киншток<br>Вена<br>Братислава } Габчиково | $\mathcal{L} \in \{0,5; 0,6; 0,7\}$ |
| Братислава-Медведёв                       | $\mathcal{L} = 0,7$                 |
| Братислава-Комарно                        | $\mathcal{L} = 0,75$                |
| Братислава-Штурово                        | $\mathcal{L} = 0,75$                |

Перманентно заданный коэффициент  $\mathcal{L}$  можно по усмотрению после первого расчета изменить и расчет повторить. Необходимую заблаговременность в Вене (или в Братиславе) мы получаем перенесением изменений уровней воды за определенное время добегания с участков Ибс-Киншток и Киншток-Вена и линейным соединением с изданным прогнозом для Вены.



Вышеупомянутый метод является основой прогнозируемой модели, запрограммированной для вычислительной машины HP 85 для текущей работы. Выходными данными является 24-часовой прогноз уровня воды для всех прогнозируемых створов на Дунае.

#### D. Соотношения для расчета гидрографа половодья

С помощью метода многократной линейной корреляции были выведены соотношения для расчета гидрографа половодья для участков:

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| Киншток (Кремс) - Братислава | $H + Q$ |
| Вена - Братислава            | $H + Q$ |
| Братислава - Медведёв        | $H$     |

После проведения контрольных расчетов, составленных соотношений и проверки их на практике, мы можем констатировать, что данные зависимости относительно надежны, если заблаговременность прогноза меньше или равна времени добегания. В качестве примера мы приводим уравнение, действительное между Кинштоком и Братиславой:

$$H_{t+\tau}^B = 0.942 H_t^K - 0.492 H_t^W + 0.576 H_t^B - 18.9$$

$$Q_{t+\tau}^B = 0.815 Q_t^K - 0.142 Q_t^W + 0.413 Q_t^B - 84$$

где  $H_{t+\tau}^B$  - прогноз для Братиславы в промежуток времени  $t+\tau$

$H_t^K, H_t^W, H_t^B$  - уровни воды во время выпуска прогноза в Кинштоке, в Вене и в Братиславе.

### Е. Текущие прогнозы на основе расходов

Данные методы прогноза используют математический аппарат, описывающий процесс распространения волн из вышерасположенных к нижерасположенным створам. Многие методы данного типа отражают в своем алгоритме (неявно или явно) явление увеличения общего стока как результат влияния промежуточного водосбора, даже в случае, если боковая приточность непосредственно не измеряется.

В конце 1984 г. в ГИПС начали использовать управляющую программу, позволяющую математическое моделирование стока с использованием нескольких типов гидрологических моделей. Данная система программ позволяет текущее предсказание стока на Дунае на основе регулярно получаемых данных с австрийского створа Ибс вплоть до последнего створа Штурово. Программная система ежедневно подготавливает прогноз для отдельных прогнозных створов путем альтернативных расчетов, т.е. для каждого прогнозного створа вычисляется прогноз с использованием нескольких введенных моделей. Конечный протокол служит гидрологической службе в качестве исходного материала при решении об издании окончательного прогноза, распределяемого затем по отдельным потребителям.

В рамках системы в настоящее время используются следующие модели:

#### $\beta$ - метод коэффициента притока

Метод основан на эмпирическом познании аналогии процесса стока в результате выпавших осадков или таяния снега с водосборного бассейна до верхнего створа со стоком с промежуточного водосбора. Для выведения формулы трансформированного процесса на главном водотоке использована модель канала с временем стока, нелинейно зависимым от величины расхода. При моделировании и предсказании коэффициента притока использован адаптивный метод фильтрующего типа. Метод особенно пригоден при предсказании на участках с неизмеряемой боковой приточностью.

### ARMA - стохастическая линейная модель с авторегрессивной и скользящей частью

Для оценки расхода неизвестных параметров использован адаптивный метод фильтрующего типа. Оценка рядов математического представления и начальная оценка параметров и стохастических характеристик проводятся офлайн с помощью извлечения корня.

В рамках системы в настоящее время ведется подготовка по использованию следующих моделей:

NLN - модель каскада нелинейных водоемов, предложенная для расчета одномерного неустановившегося течения в речных руслах. Модель речного участка представляет каскад одинаковых нелинейных водоемов, где приток на данном речном участке является притоком в первый фиктивный водоем серии, сток из него является притоком во второй искусственный водоем серии и т.д., вплоть до стока из последнего водоема, являющегося стоком с речного участка. Трансформирующая функция имеет экспоненциальный вид с итеративной схемой оценки.

RIMO - нелинейная пороговая модель. Данная нелинейная модель является комбинацией двух или нескольких различных линейных моделей, действующих параллельно. Трансформирующая функция отдельных линейных моделей дана в виде импульсной реакции. Синтез выходного гидрографа проводится путем конволюции. Оценка ординат импульсных реакций проводится отдельно.

### MUSKINGUM - двухпараметрическая линейная концептуальная гидрологическая модель

Один параметр выражает вес значимости притока на рассматриваемый участок и стока с участка на объем аккумулярованной воды на рассматриваемом участке. Второй параметр является коэффициентом объема, выражающим время запаздывания. Для расчета неизвестных параметров были выбраны графический метод и метод испытания-ошибки.

Г. Соотношения для паводочных максимальных уровней воды и расходов.

Регрессивные соотношения для паводочных максимальных уровней и для расходов воды были выведены для участков:

|                     |   |   |
|---------------------|---|---|
| Линц-Братислава     | H | Q |
| Ибс-Братислава      | H | Q |
| Киншток-Братислава  | H | Q |
| Вена-Братислава     | H | Q |
| Братислава-Медведёв | H |   |
| Братислава-Комарно  | H | Q |
| Братислава-Штурово  | H |   |

H - уровень воды (см); Q - расход (в м<sup>3</sup>/с).

Вышеупомянутые соотношения были выведены для различных комбинаций переменных. Проверенные и наиболее себя оправдавшие соотношения включены в программу для вычислительной машины HP-85.

В качестве примера дается участок Киншток-Братислава:

$$H_B = 0.697 H_K + 0.225h_{BK} + 0.88h_{MJK} + 45.6$$

$$Q_B = 0.719 Q_K + 0.261q_{BK} + 0.633q_{MJK} + 263$$

где

- $H_B$  - прогнозируемый паводочный максимальный уровень воды в Братиславе,
- $H_K$  - паводочный максимальный уровень воды в Кинштоке,
- $h_{BK}$  - уровень воды в Братиславе в момент максимального уровня воды в Кинштоке,
- $h_{MJK}$  - уровень воды в Моравском Яне (Морава) в момент паводочного максимального уровня воды в Кинштоке,

- $Q_B$  - прогнозируемый кульминационный расход в Братиславе,  
 $Q_K$  - кульминационный расход в Кинштоке,  
 $Q_{BK}$  - расход в Братиславе в момент кульминации в Кинштоке,  
 $Q_{МJK}$  - расход в Моравском Яне в момент кульминации в Кинштоке.

Для вышеупомянутых участков построены аналогичные соотношения методом графической корреляции.

### Г. Используемые вычислительные машины

Для подготовки, контроля и использования на практике прогноза служит вычислительная техника. Для научно-исследовательских работ в области моделирования стока сначала использовалась вычислительная машина ЕС 1040. Главные задачи моделирования решались, решаются и сегодня на упомянутой вычислительной машине. Вычислительная машина ЕС 1040 позволяет выполнять решение объемных работ, однако она не годится для оперативных задач. Для подготовки процедур прогноза, ориентированных на применение в гидропрогнозной практике, используется главным образом вычислительная машина HP-85. Результатом вспомогательных программ являются проверенные модели для соответствующих речных участков. Данные модели используются в рамках управляющих программ, применяемых пока на вычислительной машине HP-85.

Учитывая постепенное внедрение автоматизированного измерения с помощью автоматических гидрологических станций АГС, была создана многомашинная система сбора информации SPU 800 и SM 50/40. Другие виды информации (метеорологическая, радиолокационная и т.д.) в настоящее время собираются телекоммуникационной вычислительной машиной ЕС 1011. Для службы ГИПС подготавливается терминальное соединение.

Реализацию информационной службы, включая сбор, обработку и предоставление, обеспечит вычислительная машина SM 4/20, внедрение которой в службу ГИПС в настоящее время подготавливается. Поэтому в настоящее время отдельные прогнозные программы пересматриваются с целью создания цельной системы прогноза в рамках вычислительной машины (SMEP) с единым основным массивом данных, систематически дополняемым для сбора наблюдений. В рамках системы прогноза единый основной массив данных будут использовать все прогнозные модели (метод соответствующих изменений уровня воды, регрессивные соотношения и постоянные методы на основе расходов).

#### Н. Влияние антропогенной деятельности на прогноз

В результате измененного режима стока, обусловленного антропогенной деятельностью в водосборном бассейне, необходимо использовать процедуры систематически модифицировать. Антропогенная деятельность в бассейне Дуная имеет рассредоточенный (площадной) характер (сельскохозяйственная, млеоративная, лесохозяйственная и иная деятельность) и концентрированный характер - результат создания различных гидротехнических сооружений и регулировочных работ.

Антропогенная деятельность, с прогностической точки зрения, является фактором, неблагоприятно влияющим на качество прогноза. Особенно, в результате деятельности водоемов на Дунае или на его притоках происходит сокращение времени добегаания и изменение способа трансформирования стока. Принимая во внимание подпор и изменение объемов отдельных водоемов (сооружений) и обратный подъем нижних уровней в результате работы гидротехнических сооружений, результаты измерений в большинстве измеряемых створов на австрийском участке Дуная не дают реальную картину гидрологической ситуации в водосборном бассейне.

Ввиду небольших аккумуляционных площадей гидротехнических сооружений на Дунае, этот, с прогностической точки зрения, неблагоприятный фактор проявляется только в виде сравнительно небольшого нерегулярного волнения, в основном не превышающего 20-40 см нормальный режим стока в створе Братислава. На других створах чехословацкого участка влияние австрийских гидротехнических сооружений постепенно сглаживается. При больших или паводковых расходах манипуляция гидротехнических сооружений проявляется в незначительной степени. На чехословацком участке Дуная наиболее выразительно проявляется влияние углубления русла Дуная около Братиславы и различные регуляционные работы, связанные со строительством Габчиково-Надьмарош. С созданием гидроузлов ситуация, с точки зрения прогноза, радикально изменится (с точки зрения измерения и предсказания).

Для устранения или минимального влияния антропогенной деятельности в водосборном бассейне на прогнозную деятельность ГИПС используются два метода. Первый - преобразование прогнозных процедур на основе данных за последний период. Имеется в виду выведение новых параметров используемых прогнозных соотношений. Второй - регулярное приспособление предсказания к изменяющимся гидрологическим условиям с помощью адаптивных алгоритмов, включенных в используемые методы.

Сооружение гидроузлов на Дунае вызывает постепенное исключение деятельности опорных прогнозных водомерных постов.

Значительное влияние на прогноз уровней воды и расходов имеет сооружение обводного канала в Вене. В случае незнания суммарного притока Дуная в Вене (сам Дунай и два канала) возможность предсказания при наводнении, на основе станции Вена, становится очень ограниченной.

## I. Долгосрочные прогнозы на Дунае.

Долгосрочные прогнозы на 1 месяц издает Дунайская Комиссия на чехословацком участке Дуная для поста Комарно. Данные прогнозы имеют информационный характер.

Среднесрочные прогнозы следующие:

- Согласно договору с Дунайской Комиссией, регулярно издается NIVGAR - прогноз при понижении от уровня воды в Братиславе 300 см, а именно, для Братиславы за 2 дня и для Комарно за 3 дня. Гарантия - 50 см для уровня воды в Братиславе 300-270 см, 40 см для уровня 270-240 см и 30 см для уровня 240 см и ниже. Для среднесрочных прогнозов разработана методика на основе кривых истощения стока, использование которых, учитывая антропогенную деятельность в водосборном бассейне Дуная, только ориентировочно.

- В рамках охраны сооружения гидроузла на Дунае издается 1 раз в неделю (в пятницу) прогноз уровня воды для Братиславы на 2 дня и ожидаемую тенденцию на 3 дня.

## J. Программа усовершенствования гидрологических прогнозов на Дунае.

Влияние антропогенной деятельности выразительно отразилось на гидрологическом режиме верхнего течения Дуная. Сооружение системы водоемов и каналов вызвало ускорение процесса стока, что означает сокращение времени добегаания. Другим неблагоприятным явлением, связанным со строительством гидротехнических сооружений и оказывающим влияние на прогноз, была ликвидация основных гидрологических постов. Новосозданные створы в большинстве случаев не дают реальную картину гидрологической ситуации - намеренные величины искажены.

Данный факт необходимо будет учитывать в методиках прогноза.



Было бы желательно рассмотреть возможность осуществления совместных работ экспертов Австрии, Чехословакии и Венгрии в рамках Дунайской Комиссии с целью создания единой модели для прогноза расходов и уровня воды.

4.1.1.4. в Венгерской Республике.

см. пункт 4.2.1.4.

4.1.1.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии.

См. пункт 4.1.2.5.

4.1.1.6. в Республике Болгарии.

Оперативное долгосрочное прогнозирование  
месячных минимальных уровней реки Дунай  
на болгарском побережии.

Институт гидрологии и метеорологии - БАН  
бульвар Ленина 66, София 1184, Болгария.

Резюме

Цель настоящей работы - долгосрочное прогнозирование месячных минимальных уровней реки Дунай на болгарском побережии в оперативном режиме сбора информации и выпуска прогнозов. Вначале изложены основные принципы построения прогностических уравнений. Применяемый физико-статистический метод даёт возможность прямого подключения информации об атмосферной активности в прогностические связи, в виде разложений в рядах по ЕОФ полей геопотенциала, относительно геопотенциала и т. д. Прогнозы оценивались на независимом материале способом  $S/\bar{S}$  (скользящий контроль) и за последние 20 лет это соотношение находится в пределах 0,41-0,59. Уровень абсолютных ошибок за период октябрь 1984 г. - январь 1985 г. составляет в среднем 30 см.

## Введение

Долгосрочное прогнозирование минимальных уровней реки Дунай является одним из важных вопросов хозяйственного использования этой большой реки в целях судоходства, эксплуатации гидротехнических сооружений и т.д. Водосбор Дуная расположен на территории ряда европейских государств и оперативный сбор данных по элементам водного баланса пока не реализован. Кроме того, долгосрочные прогнозы осадков имеют плохую оправдываемость. Исходя из того, что атмосферная активность является существенным фактором формирования режима минимальных уровней, в качестве прогностического метода выбран физико-статистический метод. Он основан на эмпирически утвержденном предположении о существовании линейных связей между временной изменчивостью атмосферных полей в некоторых зонах Северного полушария, названных "районами максимальной информативности" - РМИ и прогнозируемой величиной, с некоторым сдвигом во времени. Основными вопросами, которые надо решить, являются: нахождение оптимального расположения РМИ, соответствующие атмосферные поля, совокупность оптимальных предсказателей и прогностических уравнений в условиях оперативного получения данных и достаточно хорошей оправдываемости прогнозов.

## Методика исследования

Физико-статистический метод предусматривает в качестве первого шага нахождение оптимального местоположения РМИ. С этой целью (Димитров 1985) вычисляются парные коэффициенты корреляции предиктанта (месячные минимальные уровни) и среднемесячными величинами соответствующего атмосферного поля, со сдвигом во времени, в узлах регулярной сетки Северного полушария. Строятся карты изокоррелянт, которые являются основой поиска зон повышенной линейной связи между атмосферными полями и предиктантами. Каждой прогнозируемой величине соответствует ряд изокоррелянтных карт по разным атмосферным полям и

разным сдвигам во времени. При анализе выделяют только те узлы регулярной сетки, в которых вычисленные коэффициенты корреляции, при доверительной вероятности 0,95, являются значимыми. Параметры РМИ определяются, имея в виду число таких узлов, в каждой зоне (не менее 6-8), а также сдвиг во время (не менее двух месяцев).

Следующим шагом сжатия информации является разложение атмосферного поля РМИ в ряд главных компонентов — естественные ортогональные функции ЕОФ (Багров, 1959). Важным является здесь определение количества значимых членов в разложении. Оценки значимости делаются при помощи стандартных дисперсионных критериев и обычно, чтобы дисперсия разложения превышала уровень 95% дисперсии исходного поля, достаточно ограничиться 6-8 членами. Поэтому во всех случаях дальше принято, в множестве возможных предикторов включать первые 10 коэффициентов разложения по ЕОФ в РМИ.

Множество возможных предикторов дополняется также данными о предшествующей водности (Змиева и др., 1978) представляющими собой месячные минимальные уровни в рассматриваемом створе, предшествующие периоду предиктанта со сдвигом не менее двух месяцев. Таким образом каждому предиктанту сопоставляется множество возможных предсказателей. Число РМИ по каждому предиктанту составляет обычно 2-3, а возможные предсказатели 30 - 40. В качестве эффективного метода при просеивании предсказателей использован пошаговый регрессионный метод (Efroimson, 1962). Здесь реализован вариант последнего, который является методом включения по частному критерию Фишера. В качестве основы составленного алгоритма использован пакет прикладных программ (IBM-SSP, ver.3). Дополнительно создана возможность выпуска проверочных независимых прогнозов по методу скольжения и вычисления дисперсионного соотношения оценки точности прогнозов  $S/\sigma$ . Кроме того, используя найденное прогностическое уравнение, выпускаются оперативные прогнозы на базе актуальных данных от предсказателей.

## Исходные данные

В первую очередь исследовалась частота появления годового абсолютного минимума уровней на болгарском побережье по месяцам с сентября по февраль в течение последних 60 лет. Оказалось, что с максимальной частотой (Димитров, 1985 г.) годовой минимум реализуется в ноябре и декабре, к тому же в эти месяцы наблюдаются его самые низкие абсолютные величины. Исследован также уровень линейной связи между месячными минимальными уровнями, наблюдаемыми в разных странах, на болгарском побережье. Парные коэффициенты корреляции очень высоки (0,93-0,96) и в этом смысле достаточно выпускать прогнозы только по одному пункту. Имея в виду необходимость постоянства кривой расходов, в качестве прогностического выбран створ г. Свищова, а предиктантами являются месячные минимальные уровни по четырем месяцам с октября по январь. Скользящий контроль осуществлялся с 1964 по 1983 гг., а прогнозы оперативно выпускались за 1984/1985 гг.

При составлении совокупностей возможных предикторов использованы среднемесячные величины полей геопотенциала уровнями 1000 и 500 мб. и относительного геопотенциала в слое 1000/500 мб. в узлах регулярной сетки выше 20 с.ш., шагом по долготе 10 и по широте 5. Поиск РМИ осуществлялся со сдвигом 6-2 месяцев относительно соответствующего предиктанта. Минимальные месячные уровни включены в качестве возможных предикторов со сдвигом 4-2 месяцев соответственно.

## Построение прогностических уравнений

На рис.1 показана блок-схема созданного алгоритма и последовательность оперативного приема и обработки информации в целях выпуска долгосрочных прогнозов. Необходимо еще упомянуть, что архив среднемесячных величин оперативно пополняется способом усреднения ежедневных телеграмм, принимаемых по коду GRID - WMO h GMT

## Результаты

При обозначении через  $N_M$  предиктантов - уровнями месяца  $M$ , с октября (X) по январь (I), а через  $T_{Pi}^M$  коэффициентов разложения атмосферных полей ( $N_i$ -N500,  $P_i$  - N1000,  $O_i$  -OT500/1000), месяца  $M$  и порядковым номером  $i$ , полученные прогностические уравнения можно записать:

$$N_X = -0,25 T_{N1}^8 - 0,63 T_{P1}^5 + 1,01 T_{N5}^3 + 2716 \quad (1)$$

$$N_{XI} = 1,78 T_{P1}^6 + 0,87 T_{P1}^5 - 1568 \quad (2)$$

$$N_{XII} = 0,32 T_{P1}^{10} + 0,44 T_{P1}^5 + 2,02 T_{P1}^{10} - 281 \quad (3)$$

$$N_I = -0,30 T_{N1}^9 + 0,35 N_{XI} + 0,27 T_{P10}^1 - 1,4 T_{P10}^7 + 576 \quad (4)$$

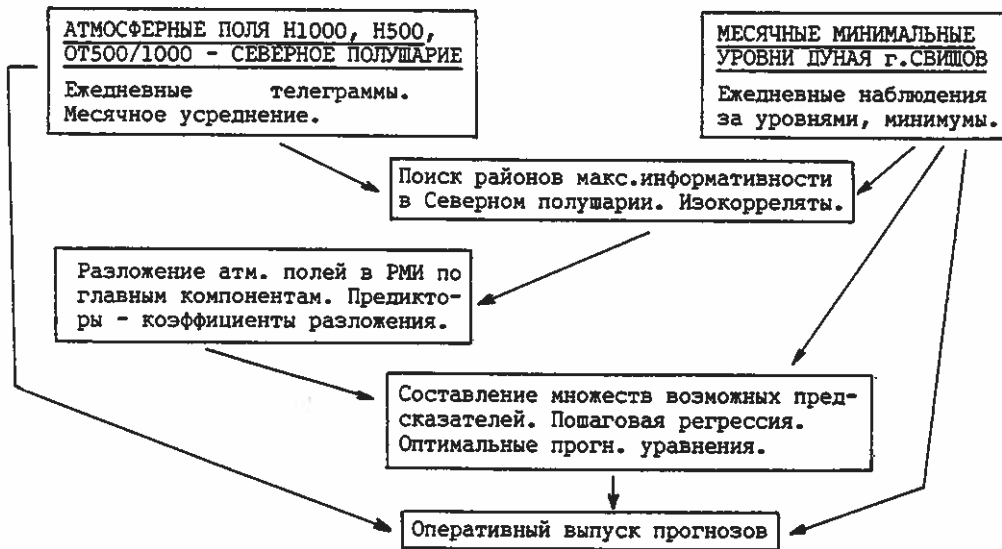


Рис.1. Блок-схема алгоритма и обработки информации.

Полученные районы максимальной информативности даны в таблице 1. Видно, что каждый предиктант имеет по три района с разными сдвигами во времени. Это явление, вероятно, объясняется фактом, что процессы, формирующие режим минимального стока по разному связаны с атмосферной активностью. Разумеется атмосферные параметры косвенно формируют минимальный сток, поскольку содержат временную изменчивость, которая через элементы гидрологического цикла, формирует временную изменчивость минимальных уровней.

Таблица 1. Районы максимальной информативности на Северном полушарии.

| Предиктант<br>Месяц | Район |       |       |         | Район |       |       |         |
|---------------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|
|                     | Поле  | Месяц | с.ш.  | в.д.    | Поле  | Месяц | с.ш.  | в.д.    |
| X                   | AT500 | У     | 25-40 | 50-70   | P1000 | У11   | 55-70 | 230-250 |
|                     | AT500 | У111  | 30-50 | 180-200 |       |       |       |         |
| X1                  | P1000 | 1У    | 15-30 | 280-320 | P1000 | У     | 55-65 | 70-100  |
|                     | P1000 | У111  | 55-70 | 300-330 |       |       |       |         |
| X11                 | P1000 | X     | 50-65 | 40-80   | OT5/1 | У     | 30-45 | 330-350 |
|                     | AT500 | X     | 35-60 | 310-330 |       |       |       |         |
| 1                   | P1000 | X     | 60-75 | 140-190 | AT500 | 1X    | 45-65 | 130-160 |
|                     | AT500 | У11   | 40-60 | 260-280 |       |       |       |         |

Таблица 2. Оценки прогностических уравнений.

| Месяц |      |      |      | Уровень | Прогноз | Разность |
|-------|------|------|------|---------|---------|----------|
| X     | 0,59 | 0,83 | 12,0 | 175     | 207     | -32      |
| X1    | 0,57 | 0,83 | 19,1 | 98      | 71      | 27       |
| X11   | 0,46 | 0,90 | 22,4 | 115     | 150     | -35      |
| 1     | 0,41 | 0,93 | 23,8 | 61      | 250     | -189     |

Оценки надежности прогностического метода и точности прогнозов строились на независимом материале методом скольжения, используя  $S/\bar{C}$ . Анализируя таблицы 2 можно утверждать, что дисперсионное соотношение  $S/\bar{C}$  изменяется в пределах 0,4-0,6 и удовлетворяет требования WMO к моделям, внедренным в оперативную практику. В той же таблице показаны вычисленные величины коэффициента множественной корреляции и критерии Фишера, которые можно использовать в качестве дополнительной информации о надежности полученных прогностических связей. В конце таблицы 2 даны зарегистрированные и спрогнозированные месячные минимальные уровни с декабря 1984 г. по январь 1985 г. За исключением последнего месяца, в котором наблюдался ледяной затор, прогнозы хорошо оправдываются.

#### Список литературы

- Багров Н.А. (1959). Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. Труды ЦИП, вып.74, Гидрометиздат, 16-34.
- Димитров Д. (1985). Долгосрочное прогнозирование месячных минимальных уровней реки Дунай. Известия ИГМ - БАН, т.1, Издательство БАН, 142-157.
- Efroimson M.A. (1962). Mathematical Methods for Digital Computers. John Wiley and Sons, New York, 17th chapt.
- Змиева Е.С., Климова В.В. (1977). Минимальные уровни воды р.Дунай в осенний период и возможности их прогноза. 9 конф. придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Комиссия придунайских стран, 73-82.
- IBM Scientific Subroutine Package Version - III (1966). IBM Technical Publications Department. New York, 230-265.

#### 4.1.1.7. в Румынии

См. пункты 4.2.1.7. и 4.2.2.7.

#### 4.1.1.8. в Союзе Советских Социалистических Республик

"Метод прогнозов уровней и расходов воды Дуная, основанный на закономерностях истощения русловых запасов воды и применения компонентного анализа" - Мухин В.М., Гидрометцентр СССР.

Общая постановка задачи. В Гидрометцентре СССР разработаны методы прогнозов характерных (максимальных, средних и минимальных) уровней и расходов воды на период 10, 15 и 20 суток, а также способ прогноза гарантированных расходов воды для нескольких створов на р. Дунай. В одном методе учитывается влияние на уровень воды в заданном створе запасов воды и их распределения по длине русла выше этого створа, в другом дополнительно учитываются осадки, выпавшие на водосбор. В методе прогноза гарантированных расходов используется описание закономерностей истощения русловых запасов.

Для нахождения неизвестных параметров моделей, применяемых в перечисленных методах прогнозов, применяются компонентный анализ и процедуры оптимизации.

Объем воды  $W_j$  на  $j$  - том участке русла может быть приближенно выражен следующим образом:

$$W_j = 0,5l_j (\omega_j + \omega_{j+1}), \quad (1)$$

где  $\omega_j$  - площади живого сечения в створах реки;

$l_j$  - длина участка между створами.

Связь площади живого сечения с уровнем воды  $H$  в  $j$  - том створе можно выразить соотношением вида

$$\omega_j = a_j (H_j + d_j)^{b_j}$$

где  $a_j$ ,  $d_j$  и  $b_j$  - параметры. (2)



Если упростить последнее выражение, приняв  $b_j=1$ , то легко перейти к линейному выражению запаса воды на  $j$ -том участке реки через уровни

$$W_j = 0,5 l_j (\alpha_j H_j + \alpha_{j+1} H_{j+1} + \gamma_j) \quad (3)$$

Допущенные погрешности при замене нелинейных выражений линейными могут приводить к снижению точности прогнозов при экстремальных значениях уровней. Однако опыт показывает, что неизвестные в момент составления прогноза приток воды за период заблаговременности, боковой приток и другие неучтенные факторы оказывают более существенное влияние на результаты прогнозов.

Подобным же образом можно получить выражение объема воды в русловой системе с помощью расходов воды и времени добегания воды между створами.

Для нахождения параметров зависимости прогнозируемого уровня воды в заданном створе реки от запасов воды в выше расположенной речной системе в виде

$$H_{t+k} = \sum_{j=1}^{j=n} \beta_j W_j \quad (4)$$

легко с помощью уравнения (3) перейти к линейному уравнению с неизвестными параметрами в виде

$$H_{t+k} = \sum_{j=1}^{j=n} X_j H_j + C \quad (5)$$

где  $t$  - момент составления прогноза;  $K$  - период заблаговременности;  $H$  - уровни в  $j$ -тых створах основного русла реки или речной системы;  $X_j$  и  $C$  - параметры.

Определение числовых значений параметров линейных моделей по известной информации относится к классу задач и приводит к необходимости решать нормальную систему уравнений, которая в матричном виде записывается следующим образом:

$$Ax = y$$

(6)

где  $A$  - оператор, представляемый корреляционной (или ковариационной) матрицей;  $y$  - вектор взаимной корреляции аргументов в предсказываемой с их помощью функции.

В отношении физической задачи важно, чтобы малым ошибкам в исходных данных соответствовали малые ошибки в решении. Это требование является одним из требований корректной постановки задачи. При решении обратных задач в гидрологических прогнозах проявляется такой парадокс, связанный с плохой обусловленностью систем уравнений, представляющих эти задачи; введение новых факторов или более детальное освещение одного фактора во времени или пространстве приводит, как правило, к ухудшению решений обратных задач, сказывающемся как в физической неправдоподобности этих решений, так и в снижении точности прогнозов на независимой выборке.

Параметры уравнений вида (6) находились с помощью компонентного анализа совместно с критериями выбора решения, разработанными в теории решения некорректных задач. Детальное описание этого метода и практические примеры его применения представлены в работах (1,2). Ниже приводится лишь основное уравнение, с помощью которого отыскивается решение

$$\bar{x}_\zeta = \sum_{j=1}^{\zeta \leq n} (\beta_j / \lambda_j) U_j; \quad \beta_j = (y, U_j) \quad (7)$$

где  $\lambda_j$  и  $U_j$  - соответственно, собственные числа и собственные векторы корреляционной матрицы  $A$ ;  $\beta_j$  - векторные произведения взаимнокорреляционной функции /правой части уравнения (6)/ с собственными векторами;  $n$  - порядок решаемой системы;  $\zeta$  - число удерживаемых компонентов решения.

Выбор числа ( $\zeta$ ) удерживаемых компонентов зависит от дополнительной информации (о решении, об ошибках исходных данных или др.), имеющейся у исследователя.

При разработке методик прогнозов характерных уровней воды в нескольких створах на р. Дунай совместно с компонентным анализом применен квазиоптимальный критерий выбора приближенного решения. Смысл этого критерия состоит в отыскании одного из самых глубоких локальных минимумов функции

$$|\beta_j / \lambda_j| = f(j) \quad (8)$$

Для нахождения параметров прогностических уравнений, в которых использовались расходы воды, применялся также метод оптимизации. Параметры считались оптимальными при достижении минимума следующего функционала

$$f(Q_t, Q_{t+k}, X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N(T-k)} [\bar{Q}_{t+k} - \tilde{Q}_{t+k}(Q_t, X)]^2}{\sum_{i=1}^{N(T-k)} (\bar{Q}_t - \bar{Q}_{t+k})^2}}, \quad (9)$$

где  $\bar{Q}_{t+k}$  и  $\tilde{Q}_{t+k}$  - соответственно фактические и прогнозируемые величины расходов воды;  $\bar{Q}_t$  - фактические расходы воды в момент составления прогноза;  $N$  и  $T$  - соответственно, число расчетных периодов и число суток в каждом из них;  $X$  - вектор искомых параметров.

Для повышения точности прогнозов средних за декаду расходов воды в с. Бездан привлечена информация о полях осадков выше этого пункта. Поля осадков представляются с помощью коэффициентов разложения по собственным векторам корреляционной матрицы этих полей.

Разложение поля в полиномиальный ряд имеет следующий вид:

$$F(x,y) = B_{00} + B_{10} U_1(z) + B_{01} Y_1(\psi) + B_{11} U_1(z) Y_1(\psi) \dots, \quad (10)$$

где  $U(z)$  и  $Y(\psi)$  - системы собственных векторов по взаимноперпендикулярным направлениям координат полей осадков  $Z$  и  $\Psi$ .

Практическая разработка способов прогноза. Первым этапом разработки методики прогноза, основанной на использовании информации об уровнях или расходах воды на вышележащих постах, является получение корреляционной (или ковариационной) матрицы (А) для временных рядов наблюдений на этих постах, а также взаимокорреляционной функции (у) наблюдений на посту, для которого будут составляться прогнозы, с наблюденными на вышерасположенных постах, принятых в расчет. Длина ряда наблюдений должна в 10-15 раз превосходить число принятых в расчёт постов.

Далее вычисляются собственные числа  $\lambda_j$ , собственные векторы  $U_j$ , суммы произведений  $U_j$  последовательно с каждым из собственных векторов  $U_j$ , т.е. скалярные произведения  $\beta_j$ , и решается уравнение (7) до значения  $j = \mathcal{L}$ , при котором функция  $|\beta_j / \lambda_j|$  имеет глубокий локальный минимум по  $j$ .

Предварительно должны быть рассчитаны среднепогодные величины уровней и расходов воды для каждого гидрометрического створа, а также среднеквадратические оценки изменчивости ( $\sigma_k$ ) уровней и расходов за период заблаговременности прогнозов (K) и многолетней изменчивости этих же величин ( $\sigma$ ).

Методики прогнозов характерных уровней и расходов воды на периоды 10, 15 и 20 суток разработаны для с.Бездан, с.Богоево, с.Нови-Сад, с.Браила и с.Тульча.

Период наблюдений, принятых в качестве зависимой выборки, составлял по 195 дней (с 20 марта по 1 октября) в каждом из 8 лет (1963-1970 гг.), т.е. более 1500 случаев. Диапазон изменения расходов воды в п.Бездан за этот период составлял около 5000 м<sup>3</sup>/с.

Для прогноза характерных уровней воды в с.Бездан за период 10, 15 и 20 суток используются данные об уровнях в день составления прогноза на водомерных постах в следующих створах: с.Регенсбург (1), с.Шердинг (2), с.Вена (3), с.Линц (4), с.Братислава (5), с.Будапешт (6), с.Мохач (7) и в самом Бездане (8). При прогнозе уровней на 15 суток, кроме перечисленных данных в день составления прогноза  $t$ , в уравнение включены также данные на тех же постах на два дня раньше ( $t-2$ ), само уравнение приводится ниже:

$$\begin{aligned}
 N_{15} = & 0.11N_{1,t} - 0.04N_{1,t-2} + 0.04N_{2,t} - 0.06N_{2,t-2} + 0.45N_{3,t} - \\
 & (11) \\
 & - 0.30N_{3,t-2} - 0.07N_{4,t} - 0.07N_{4,t-2} + 0.34N_{5,t} - 0.42N_{5,t-2} + \\
 & + 1.03N_{6,t} - 0.75N_{6,t-2} + 0.33N_{7,t} - 0.36N_{7,t-2} + 0.45N_{8,t} + \\
 & + 0.33N_{8,t-2}.
 \end{aligned}$$

При составлении прогнозов уровней на 10 и 20 суток для с.Богоево используются наблюдения за уровнями на постах: с.Регенсбург, с.Вена, с.Будапешт и с.Богоево на Дунае, а также и с.Барч на р.Мораве.

При прогнозе уровня в с.Нови-Сад на 10, 15 и 20 суток используются наблюдения за уровнями в с.Бездан, с.Будапешт, с.Братислава, с.Линц, с.Регенсбург, с.Шердинг и с.Нови-Сад.

Оценки эффективности перечисленных методик прогнозов на независимой выборке данных, включающей три года (1971-1973 гг.) наблюдений по 195 суток в каждом году, для с.Бездан и с.Богоево находятся между 0.45  $\zeta_k$ , 0.69 для с.Нови-Сад между 0.64  $\zeta_k$  и 0.78  $\zeta_k$ .

Для с.Браила прогнозы характерных уровней (средних и минимальных) производятся по наблюдениям за расходами в вышележащих створах: с.Ново-Село, с.Лом, с.Свиштов, с.Силистра, и уровнями в самом с.Браила. Относительная ошибка прогнозов  $0,63 \text{ б}_к - 0,66 \text{ б}_к$ .

Уравнения для прогнозов минимальных и средних расходов воды на 10 и 20 суток в п.Тульча имеют относительные ошибки в пределах  $0,49 \text{ б}_к - 0,65 \text{ б}_{кк}$ . Аргументами в этих уравнениях являются наблюдения за расходами в с.Тульча (1), с.Ново-Село (2); с.Лом (3), с.Свиштов (4) и с.Селистра (5). Пример уравнения для прогноза минимальных расходов на 20 суток приведен ниже:

$$20=0,36Q_{1,t}+0,29Q_{2,t}+0,01Q_{3,t}+0,31Q_{4,t}+0,01Q_{5,t}. \quad (12)$$

Учет распределения осадков в бассейне р.Дунай выше п.Бездан при прогнозе расходов воды в этом пункте производится следующим образом. Бассейн разбит регулярной сеткой на 40 (4x10) прямоугольников, в центр которых интерполируются осадки, измеренные на ближайших гидрометеорологических станциях. Интерполяция применяется линейная. Веса станций приняты обратно пропорциональными расстоянию от их центра прямоугольника, но с учетом их взаимного расположения. Представление полей осадков, задаваемых в 40 точках, производилось с помощью уравнения (10). В этом уравнении участвуют две системы собственных векторов, соответствующие двум направлениям координатных осей  $Z$  (1÷4) и  $\Psi$  (1÷10).

Для прогнозов характерных расходов в с.Бездан удержано два первых коэффициента разложения  $B_1$  и  $B_2$  по оси  $Z$  и четыре коэффициента разложения по оси  $\Psi$ :  $B_1, B_2, B_3, B_4$ . Общий вид уравнения для прогноза среднего декадного расхода воды ( $Q_{10}$ ) показан ниже:

$$Q_{10} = a \sum_{i=1}^6 \tau_i Q_i + \sum_{i=1}^6 C_i B_i, \quad (13)$$

где  $Q_i$  - расходы воды в вышележащих створах;  $\tau_i$  - время добегания воды между гидрометрическими створами;  $a$  и  $C_i$  - параметры, находящиеся с помощью метода оптимизации.

Первый член правой части (13) представляет запасы воды в русле р. Дунай до с. Бездан и в русле его притока р. Инн, второй член - поля сумм осадков на водосборе до с. Бездан за месяц, предшествующий моменту составления прогноза.

Относительная ошибка уравнения (13) на независимой выборке для прогнозов средних декадных расходов равна  $0,52 \text{ } \text{б}_\text{к}$ . Наибольший выигрыш в точности по этому уравнению получен для прогнозов максимальных расходов на декаду:  $0,65 \text{ } \text{б}_\text{к}$  - только по русловым запасам воды и  $0,49 \text{ } \text{б}_\text{к}$  - по русловым запасам с учетом осадков на поверхность бассейна.

Кроме методики прогноза минимальных расходов воды, разработан метод прогноза гарантированных с большой обеспеченностью значений расходов на те же периоды заблаговременности. Метод основан на использовании закономерностей истощения запасов воды в руслах. В нем применяются кривые истощения запасов воды (характеризуемых расходами  $Q_0$  в начальные моменты) в виде экспоненты со сложным показателем:

$$Q(t) = Q_0 \exp \left[ -at / (bn+1) \right] + Q_g \quad (14)$$

где  $n$  - сдвиг по времени от начального момента;  $Q_g$  - базисный сток;  $a$  и  $b$  - подбираемые с помощью процедур оптимизации параметры.

Влияние распределения запасов воды по длине русла Дуная на их истощение через створ, для которого составляются прогнозы гарантированных расходов, учитывается с помощью формулы

$$Q_r = \sum_{i=1}^2 Q_{0,i} \int_0^t \exp \left[ -a\tau_i / (b\tau_i + 1) \right] P_i(t-\tau) d\tau + \quad (15)$$

$$+ \sum_{i=3}^6 Q_{0,i} \int_0^t \exp(-1/\tau_i) P_i(t-\tau_i) d\tau ,$$

где  $Q_r$  - гарантированный расход воды в с.Бездан;  $Q_{0,i}$  - расход воды в момент составления прогноза в  $i$ -том створе;  $P_i(\tau)$  - кривые добегаания воды от  $i$ -го створа до створа, для которого составляется прогноз.

Проверка уравнения (15) на 500 случаях независимой выборки показала высокую надежность прогнозов, составляемых с его использованием.

#### Литература:

- Мухин В.М. Применение эмпирических ортогональных функций к рейсовым прогнозам минимальных уровней воды. - Труды Гидрометцентра СССР, 1968, вып.25, стр. 47-69.
- Мухин В.М. Решение некоторых обратных задач гидрологии с помощью регуляризирующих алгоритмов. - Труды Гидрометцентра СССР, 1969, вып. 55, стр.12-37.
- Мухин В.М. Прогнозы характерных уровней и расходов воды р.Дунай с заблаговременностью 10-12 суток. - Труды Гидрометцентра СССР, 1982, вып.240, стр.3-21.



#### 4.1.2. Методы краткосрочных прогнозов уровня воды Дуная

##### 4.1.2.1. в Федеративной Республике Германии.

###### 1. Прогноз уровня воды.

На федеральном судоходном пути реки Дунай между Кельхеймом и Йохенштайном (2414,72 км - 2201,77 км) прогнозы уровня воды определяются, как правило, только в рамках Информационной службы по высоким водам. Данные сообщаются, когда уровень воды превышает следующие значения:

Гидрометрическая станция Регенсбург -

|               |          |
|---------------|----------|
| Эйзернебрюкке | - 400 см |
| Хофкирхен     | - 450 см |
| Пассау        | - 700 см |

Прогнозы уровня воды передаются:

- в 5.00 ч для 16.00 ч;
- в 11.50 ч для 22.00 ч;
- в 17.50 ч для 10.00 ч следующего дня.

Прогнозы на более длительный срок не устанавливаются.

Во время низкой воды и когда уровень воды возрастает до высокого судоходного уровня, в отдельных случаях для требований судоходства устанавливаются краткосрочные прогнозы.

###### 2. Прогнозы расхода воды.

Что касается федерального судоходного пути реки Дунай, прогнозы расхода воды не устанавливаются.

###### 3. Прогнозы ледового режима.

Информационная служба по ледовому режиму на федеральном водном пути реки Дунай возобновляет передачи данных, когда в шлюзах и внешних гаванях начинается образование льда или можно заметить сплав.

Информация о ледовом режиме содержит данные о температуре воздуха и воды, уровне воды, ледовых режимах в подпорных бьефах и на имеющемся участке (в настоящее время: Гайслинг - Вильсхофен), об условиях судоходства, работе ледоколов и, в случае надобности, прогнозы на следующий день.

Невозможно установить долгосрочные прогнозы ледовых явлений и заранее запланировать работы, необходимые для разрушения льда.

#### 4.1.2.2. в Австрийской Республике.

##### а) Ежедневные прогнозы.

Гидрологическая служба располагает в Вене и в Линце сеть измерения на расстоянии уровней воды, которая обеспечивает постоянную передачу и запись уровней воды по верхним водомерным постам Дуная и его основных притоках (19 водомерных мостов, регистрирующих на расстоянии в Линце, и 12 - в Вене). Этим службам поручена также регулярная передача официальных сведений и прогнозов об уровнях воды.

После ввода в эксплуатацию гидроузла Абвинден-Астен в июне 1979 г. водомерный пост Линц/Дунай был затоплен, в результате чего составление ежедневных прогнозов не представляется возможным. Австрийский участок Дуная от водомерного поста Ахлейтен/Дунай (2223,05 км) до гидроузла Мельк (2037,86 км) оборудован гидроузлами и между ними нет участков со свободным течением. Только участок длиной около 30 км, расположенный ниже гидроузла Мельк и участок ниже гидроузла Грейфенштейн (1948,88 км) еще находятся на естественном уклоне.

Следовательно, только Центральная служба измерения на расстоянии, находящаяся в Вене, составляет прогнозы уровней воды по водомерному посту Вена-Рейхсбрюкке/Дунай сроком на 24 часа. Для этой цели используются линейные опорные данные водомерного поста. Приблизительно половина прогнозируемых величин представляют колебания в

размере  $\pm 10$  см по отношению к фактическим величинам. Что касается второй половины величин, то тут отклонения более значительные, часто вызываемые краткосрочными изменениями метеорологических условий.

б) Прогноз уровней воды при высоких уровнях воды.

При возникновении высоких уровней воды Гидрографическая служба Верхней Австрии в Линце составляет прогноз расходов воды по водомерным постам Шердинг/Инн сроком на 3, 6 и 9 часов и по водомерному посту Линц/Дунай сроками на 6, 9 и 12 часов, а прогноз уровней воды составляется по водомерному посту Ибс/Дунай сроком на 3 и 6 часов. Уровни воды по водомерным постам Шердинг/Инн и Линц/Дунай составляются при помощи кривой распределения.

В таком случае применяемая модель основана на значительных изменениях зарегистрированных расходов по выборочным водомерным постам с учетом продолжительности действующих на данное время данных, причем участок реки распределяется на три частные системы. Принимая во внимание разные реакции стока, было введено разделение между летом и зимой для уравнений прогнозов, основанное на множественной регрессии режима подъема воды и пикового режима. Вычисления проводятся на ЭВМ, но могут быть также затем выполнены ручным способом. Учитывая опыт, накопленный в период высоких уровней воды в 1985 г. и в ходе многочисленных менее значительных зимних паводков, в настоящее время изменяется программа. В связи с этим не представляется возможным предоставить разъяснения по имеющимся погрешностям или дать уточнения.

При появлении высоких уровней воды Гидрографическая служба Нижней Австрии в Вене публикует прогнозы уровней воды сроком на 6 часов по водомерному посту Вена-Рейсхбрюкке на Дунае. При этом на основании кривой распределения выражается прогнозируемый расход в величинах уровня воды (см. 4.2.2.2-b).

4.1.2.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике.

См. пункт 4.1.1.3.

4.1.2.4. в Венгерской Республике.

См. пункт 4.2.1.4.

4.1.2.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии.

Обзор методов краткосрочных и долгосрочных гидрологических прогнозов согласно требованиям плавания на р. Дунай.

Введение.

Рациональное управление и хозяйствования водными ресурсами и охрана от их вредного влияния в прямой увязке с наблюдениями за водным режимом и его изменениями в более близком и более далеком будущем. Соответственно, заинтересованность в гидрологической информации и прогнозах в Югославии постоянно увеличивалась согласно росту экономики страны.

После подписания Конвенции о режиме судоходства на Дунае гидрометеорологическая служба Югославии взяла на себя выполнение задачи и обязательства - собирать данные и проводить обмен информацией, поступающей с гидрологических станций, передающих информацию о состоянии воды р. Дунай и ее непосредственных притоках. Наряду с этим начался также выпуск первых гидрологических прогнозов по нескольким створам рек Дунай и Сава.

Все более интенсивное плавание по Дунаю и его притокам, более частое появление повышенного уровня воды и защита от них, а также строительство больших водохозяйственных объектов требуют расширения сети информационных гидрологических станций и сети станций для обеспечения гидрологических прогнозов.

1. Положение в деле сбора и обмена гидрологической информацией, поступающей с сети информационных станций.

Существующая на территории Югославии гидрологическая информационная сеть станций охватывает 175 гидрологических станций, из них со 125 гидрологическая информация собирается ежедневно. На остальных 50 водомерных пунктах гидрологическая информация собирается только в период больших наводнений, когда уровень воды на данных пунктах превышает установленные "критические величины". Наряду с упомянутой информацией, особенно в период появления высокого или низкого уровней, ледовых явлений, гидрометеорологической службе предоставляются в распоряжение также данные, собранные на временной сети пунктов, работающих в рамках других организаций и предприятий.

Частота наблюдений уровня воды на водомерных постах в большинстве случаев не превышает два раза в день, и сбор осуществляется в 6 и 18 ч дня. В период повышенного уровня воды, на отдельных пунктах число наблюдений увеличивается. Гидрологические наблюдения осуществляют наблюдатели, которые полученную информацию передают по телефону или радио в республиканские (краевые гидрометеорологические управления. Отдельные гидрологические водомерные пункты (около 30) оснащены самыми современными дистанционными лимниграфами, на которых сбор данных осуществляется автоматически.

Обмен оперативной гидрологической информацией осуществляется внутри гидрометеорологической службы, соответственно, между гидрометеорологическими управлениями республик и краев по системе телекоммуникаций, центр которой расположен в Союзном гидрометеорологическом управлении.

Наряду с этим, в рамках существующих двухсторонних или многосторонних соглашений или конвенций, гидрологическую информацию и прогнозы из придунайских стран получает Союзное гидрометеорологическое управление.

Вся гидрологическая информация, собранная в рамках гидрометеорологической службы Югославии, также как и опубликованные прогнозы, информация и предупреждения постоянно помещаются в бюллетенях компетентных гидрологических организаций и одновременно направляются всем пользователям в данном бассейне, а также средствам массовой информации.

Для удовлетворения требований плавания на р. Дунай, вся гидрометеорологическая информация, обработанная в Союзном гидрометеорологическом управлении, ежедневно направляется всем придунайским странам и, в то же время, передается по радиопрограмме Белград в передаче "Сводка об уровне воды в реках". В этой информации данные, полученные с 40 гидрологических водомерных пунктов, расположенных на р. Дунай и его притоках, а также краткосрочные и долгосрочные прогнозы уровней воды на отдельных водомерных пунктах.

## 2. Краткосрочные прогнозы уровней (расхода) воды на р. Дунай.

Согласно характеру речного участка, уровню развитости системы сбора гидрологической информации, времени поступления информации в гидрологическо-информационный центр, а также потребностям пользователей в оперативной гидрологической практике разработки прогнозов, при разработке краткосрочных прогнозов уровней, соответственно, расходов воды на Дунае, используются различные методы и приемы. Все приемы основываются на факте, согласно которому расходы воды на створах, находящихся на нижнем течении реки, в основном, являются последствием процессов, происходящих в речной сети. Иными словами, условно можно выделить нижеследующие группы, а именно:

1. Прогнозы уровней воды или расходов, основывающиеся на теории взаимосвязанных уровней воды (расходов).

2. Прогнозы уровней или расходов воды, основывающиеся на взаимозависимостях, установленных многосторонней линейной или нелинейной корреляциях.

3. Прогнозы уровней или расходов воды, основывающиеся на законах движения воды в речной сети.

2.1. Методы, основывающиеся на теории взаимосвязанных уровней или расходов воды.

Эта группа методов уже давно используется в оперативной гидрологической практике. При определении взаимосвязи учтены соответствующие величины, имеющие место на верхнем и нижнем створах. Учитывая, что временем попадания воды на участок является  $t$ , почти совпадающим с периодом, на который разрабатывается прогноз -  $T$ , т.е.

$$Q_{nizv,t+T} = f(Q_{uzv,t}) \quad 2.1.$$

Если на створе не имеется кривая расхода и если влияние притоков значительное, чаще всего это можно изобразить в нижеследующей зависимости:

$$H_{nizv,t} = f(H_{uzv,t-\tau_1}, H_{prit,t-\tau_2}) \quad 2.2.$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - промежуток времени, в котором вода перемещалась от верхлежашего створа (на основном течении и притоке) до выходного створа.

Используя эти положения для всех створов на Дунае, по которым разрабатываются прогнозы, установлена такая взаимозависимость за период  $T=1$   $T=2$ , на который прогноз и разрабатывается. Это делается как в случаях подъема, так и в случаях спада гидрографа.

В качестве примера, в приложении № 1 для водомерного поста Богоево изображена такая взаимозависимость. Надо сказать, что соответствующая взаимозависимость разработана по всем створам р. Дунай для случаев, когда максимальный уровень воды достигает максимальные величины. В этой взаимозависимости учтено время, требуемое для появления такого уровня на наблюдаемом участке.

## 2.2. Методы, основывающиеся на теории многосторонней линейной и нелинейной корреляции.

Пользуясь теорией многосторонней линейной регрессии и, учитывая время добегаания между створами, получаем прогностическую зависимость на следующий день для элементарного участка, используя при этом соотношение расходов воды на верхнем и нижнем и на том самом створе, по которому прогноз разрабатывается, т.е.

$$B_{t+1} - B_t = K_1 A_t + K_2 A_{t-1} + K_3 B_t + K_4 B_{t-1} + K_5 C_t \quad 2.3.$$

где:  $K_1, K_2, K_3 \dots K_n$  - регрессионные коэффициенты, являющиеся функцией расхода воды в створе  $B$ , т.е.  $K_i = f(B)$ ;  $B$  - расход воды, для которого дается прогноз;  $A, C$  - расход воды на верхнем, соответственно нижнем створе;  $t$  - время.

Применением данной схемы разработаны прогностические зависимости при прогнозировании расхода воды по отдельным створам от одного до пяти дней вперед, соответственно времени добегаания от одного до другого водомерного постов.

Так, например, прогностическая зависимость при разработке прогноза расхода воды для  $t = 1$  день, для водомерного поста Бездан, имеет вид

$$Q_{t+1}^{Bez} = Q_t^{Bez} + K_D Q_t^{Baja} + K_D Q_{t-1}^{Baja} + K_D Q_t^{Bez} + K_D Q_{t-1}^{Bez} + K_D Q_t^{Bog} \quad 2.4.$$

Величины регрессионных коэффициентов  $K_{D1}$ , зависящих от расходов воды на водомерном посту Бездан, изображены на рисунке № 2.

В случае большой нелинейности между предикторами и предикантами, при разработке прогностических зависимостей можно образовать теорию нелинейной нормализованной



корреляции. При этом в начале нужно обеспечить нормализацию всех переменных и потом формировать уравнение линейной регрессии между независимой переменной  $U_0(H)$  и зависимых переменных  $U_j(H)$ , в виде:

$$U_0(H) = \sum_{j=1}^n \mathcal{L}_{0,j} U_j(H) \quad 2.5$$

При формировании прогностической зависимости происходит сдвиг предикторов во времени  $\tau_{j,k}$ , вследствие чего получаем уравнение регрессии между предиктором и предикантами в нижеследующем виде:

$$\tilde{U} [H(t)] = \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K a_{0,j,k} U_{j,k} [H(t-\tau_{j,k})] \quad 2.6$$

в котором  $U [H(t)]$  - нормализованные величины уровня воды  $H(t)$  во времени  $t$ ;  $U_{j,k} [H(t-\tau_{j,k})]$  - нормализованные величины предикторов, т.е. уровня воды во времени  $t-\tau_{j,k}$ ;  $\mathcal{L}_{0,j,k}$  - регрессированные коэффициенты;  $\tau_{j,k}$  - сдвиг во времени  $j$ -го водомерного поста и  $k$  - индекс сдвига во времени.

В процессе развития модели сначала нужно определить эмпирическую зависимость (графическую или аналитическую) между нормализованными  $U(t-\tau_j)$  и соответствующими исходными значениями переменных  $H(t-\tau_j)$ .

$$U(t-\tau_j) = U[H(t-\tau_j)] \quad H(t-\tau_j) = f [U(t-\tau_j)] \quad 2.7$$

Под оптимальными параметрами подразумеваем параметры, полученные в условиях входных створов и сочетание параметров, которые дают минимальную ошибку прогнозов.

В качестве примера скажем, что оптимальная прогностическая зависимость для прогнозов уровня воды для водомерного поста Нови Сад на р. Дунай, при условиях применения вышеуказанного принципа, дается в нижеследующем виде:

$$\tilde{H}_{t+2}^{N.S.} = f \left[ 1.41 U(H_t^{N.S.}) + 0.15 U(H_t^{Bog}) - 0.58 U(H_{t-2}^{N.S.}) \right] \quad 2.8$$

Вследствие того, что время добегающего на данном участке колеблется, а также учитывая факт, что на практике мы используем данные, получаемые в одинаковых промежутках времени, в указанную прогностическую модель вводим текущие (повседневные) коррекции получаемых прогнозов.

### 2.3. Прогноз уровней или расходов воды, основывающийся на анализе процессов, происходящих в речной сети.

В случае существенного изменения паводочной волны по всему течению реки, прогноз уровня или расхода воды разрабатывается согласно расчетам трансформации паводочной волны, применением нескольких немного отличающихся между собой гидравлическо-гидрологических моделей, т.е. трансформационных функций.

В любом случае, расход воды на замыкающем створе можно определить, основываясь на расчете трансформации входной гидрограммы и расплывания паводочной волны на входном створе участка главной реки, а также учитывая боковой приток в речную сеть.

$$Q_{nizv,t} = \int_0^t Q_{ul,t-\tau} r_{\tau} d\tau + \int_0^t q_{t-\tau} R_{\tau} d\tau \quad 2.9$$

или в конечных разностях

$$Q_{nizv,t} = \sum_{\tau=1}^{\tau_{max}} Q_{ul,t-\tau+1} r_{\tau} \sum_{\tau=1}^{\tau_{max}} q_{t-\tau+1} R_{\tau} \quad 2.10$$

где  $Q_{ul}, Q_{iz}$  - расходы воды в верхнем и нижнем створах участка;  $q_t$  - боковой приток воды в речную сеть;  $r_{\tau}$  и  $R_{\tau}$  - ординаты кривой добегания руслового стока и бокового притока.

Под боковым притоком подразумевается приток воды на участке реки, расположенном между двумя створами, и при его исчислении учтены стоки малых рек или расходы воды в основной речной сети с помощью уравнения водного баланса, а именно:

$$q = Q_{niz} - Q_{uz} \pm \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad 2.11$$

где  $\Delta W$  - меняющийся объем воды в речной сети в данном промежутке времени  $\Delta t$ .

При применении вышеуказанной методики разработана симуляционная, а потом и прогностическая модели по нескольким створам на р. Дунай. Типичным является участок со значительным боковым притоком Будапешт-Богоево, где изменение объема дано в виде функции переменного расхода и времени добегания на отдельных участках, т.е.

$$\Delta W = f(\Delta Q_{Bud}, \Delta Q_{Bez}, \Delta Q_{Bog}, \tau_{Bud-Bez}, \tau_{Bez-Bog}) \quad 2.12$$

Для всех подучастков определены зависимости времени добегания от среднего расхода на участке.

Ординаты трансформационной функции  $r_{\tau}$  и  $R_{\tau}$  получены путем оптимизации, при исчислении которой использована аналитическая форма:

$$r_{\tau} = \frac{\Delta t}{\tau_l^{(n-1)}} \left[ \frac{t}{\tau_l} \right]^{n-1} e^{-t/\tau_l} \quad 2.13$$

В процессе оптимизации для данного участка получены значения параметров  $r_{\tau}$  ( $n=5$ ;  $\tau_{\ell}=0,95$ );  $R_{\tau}$  ( $n=6$ ;  $\tau_{\ell}=0,6$ ).

В данную модель внесена текущая корректировка, суть которой повседневная корректировка входных данных, т.е. с целью того, чтобы разница между прогнозируемыми величинами и величинами, полученными наблюдением, равнялась нулю.

Данная модель использована при разработке прогнозов расходов воды на водомерном посту Богоево на период заблаговременности  $\Delta t = 1$  и  $2$  дня. Прогноз уровней воды используется в установленной зависимости  $Q = f(H)$ .

Наряду с вышеуказанными моделями в оперативной практике разработки прогнозов уровней воды (расходов воды) на р. Дунай, используются также и модели, представляющие собою улучшенный вариант модели Калинин-Милюков (участок Дуная, находящийся под влиянием подпора ГЭС "Джердап"), а также стохастическая модель - SELF-TUNING.

Ежедневные прогнозы уровней и расходов воды на р. Дунай разрабатываются по вышеуказанным моделям. Получаемые результаты являются базисом для гидрологов-прогнозистов при составлении окончательных прогнозов, предназначенных для различных пользователей.

### 3. Долгосрочные прогнозы уровня (расхода) воды на р. Дунай.

В настоящее время для выпуска долгосрочных гидрологических прогнозов для р. Дунай, используются модели, основывающиеся на эмпирической зависимости расхода воды от имеющихся запасов воды в русловой сети в момент составления прогнозов.

Например, для предсказания среднего расхода в большом промежутке времени  $Q_{i+t}$  используется его эмпирическая зависимость от объема воды в русловой сети в момент составления прогноза

$$\bar{Q}_{i+t} = f(W_i) \quad 3.1$$

В большинстве случаев, эта прогностическая зависимость оказывается недостаточно прямой из-за того, что величина стока в замыкающем створе обусловлена, как начальным объемом воды в русловой сети, так и притоком воды в русловую сеть в период, следующий за периодом действия прогнозов.

Соответственно, разработана эмпирическая зависимость как для подъема, так и для спада весеннего половодья, в которой учтено суммарное количество осадков. В отдельных случаях вопрос влияния дотоков решался установлением эмпирической зависимости.

$$\bar{Q}_{i+t} = \mathcal{L}W_i + \beta q_i \quad 3.2$$

где  $q_i$  - суточный приток воды в русловую сеть;  
 $\mathcal{L}$  - угловой коэффициент нижней огибающей прямой линии на графике связи  $\bar{Q}_{i+t} = f(W_i)$ ;  $\beta$  - угловой коэффициент средней линии связи  $\bar{Q}_{i+t} - \mathcal{L}W_i = f(q_i)$ .

Для предсказания максимума весеннего половодья используется нижеследующая зависимость:

$$Q_{\max} = f(W_i) \quad H_{\max} = f(W_i) \quad 3.3$$

причем выпуск прогнозов делается в день появления максимума притока в русловую сеть.

Кроме того, для прогнозов характерных уровней и расходов воды (максимальных, средних и минимальных) на р. Дунай в оперативной практике используются модели, разработанные согласно теории компонентного анализа и теории оптимизации (Мухин, 1982 г.).

Для повышения точности выпускаемых прогнозов в данную модель вносятся текущие корректировки прогнозов, в целях не допускания тех же самых ошибок, которые имели место в предыдущих прогнозах. Такой подход оказался целесообразным и прогнозы, которые выпускаются для 10-15 дней вперед для р. Дунай, можно считать удовлетворительными.

#### 4. Прогноз ледового режима

В оперативной практике для прогнозов ледовых явлений на р. Дунай применяются физико-статистические зависимости величин суммарной теплоотдачи (или ее индекса), необходимой для появления льда, от обуславливающих их факторов. В качестве индекса суммарной отдачи тепла используется сумма отрицательных значений температуры воздуха.

Для краткосрочного прогноза появления льда используются зависимости вида:

$$\sum \Theta_- = f(v_0) \qquad \sum \Theta_- = f(v_0, H) \qquad 4.1$$

где  $\sum \Theta_-$  - сумма средней отрицательной температуры воздуха, необходимой для ледового явления;  $v_0, H$  - температура воды, уровень воды за день до того, как температура воздуха была  $0^\circ\text{C}$ .

Такие зависимости для р. Дунай получены при учете исходных данных по всем водомерным постам. Благодаря этому можно определить минимальную сумму отрицательных температур воздуха, необходимую для начала ледообразования на данном участке или створе.

На рисунке 3, в качестве примера изображена такая зависимость для водомерного поста Бездан.

Модель для прогноза появления ледостава также основана на физико-статистической, т.е. эмпирической зависимости, а именно, она состоит в определении минимальной суммы отрицательных температур воздуха, необходимых для начала ледостава, а также критической температуры воздуха. В самом деле нужно построить график зависимости суммы отрицательных температур на период со дня появления льда до появления ледостава с учетом расхода или уровня воды в день появления льда. Однако, для разработки прогнозов появления льда, т.е. ледостава, оказалось недостаточным учитывать только сумму отрицательных температур, вследствие того, что ледостав формируется только при условии, когда средние суточные температуры ниже какой-то критической температуры  $\Theta_{\text{кг}}$ .

Критическая температура также зависит от расхода и уровня воды. Вышеуказанные зависимости в таком случае приобретают нижеследующую форму:

$$(\sum \Theta)_{\min} = f(H_{p1}) \quad \Theta_{kr} = f(H_{p1}) \quad 4.2$$

где  $(\sum \Theta)_{\min}$  - минимальная сумма средних суточных отрицательных температур воздуха, необходимая для начала ледостава,  $H_{p1}$  предледоставный уровень воды.

На рисунке 4 в качестве примера дана зависимость  $(\sum \Theta)_{\min}$ , необходимая для установления ледостава на р. Дунай у водомерного поста Бездан, от критической температуры воздуха  $\Theta_{kr}$  и уровня воды в день появления плавучего льда.

Почти на таких же принципах разработана эмпирическая зависимость для прогноза вскрытия льда на Дунае.

В целях проверки выпущенных гидрологических прогнозов, т.е. эффективности гидрологических моделей, применяемых в оперативной практике, регулярно проводится оценка точности прогнозов. При этом, наряду с графическими критериями, используются и другие - объективные, основывающиеся на взаимоотношении между погрешностью прогноза и изменениями, предсказываемыми переменной на период заблаговременности прогноза.

Рис. 1. Связь соответственных уровней

$$H_{t+1}^{\text{bogojevo}} = f(H_t^{\text{bezdan}}, H_t^{\text{d.miholjac}})$$

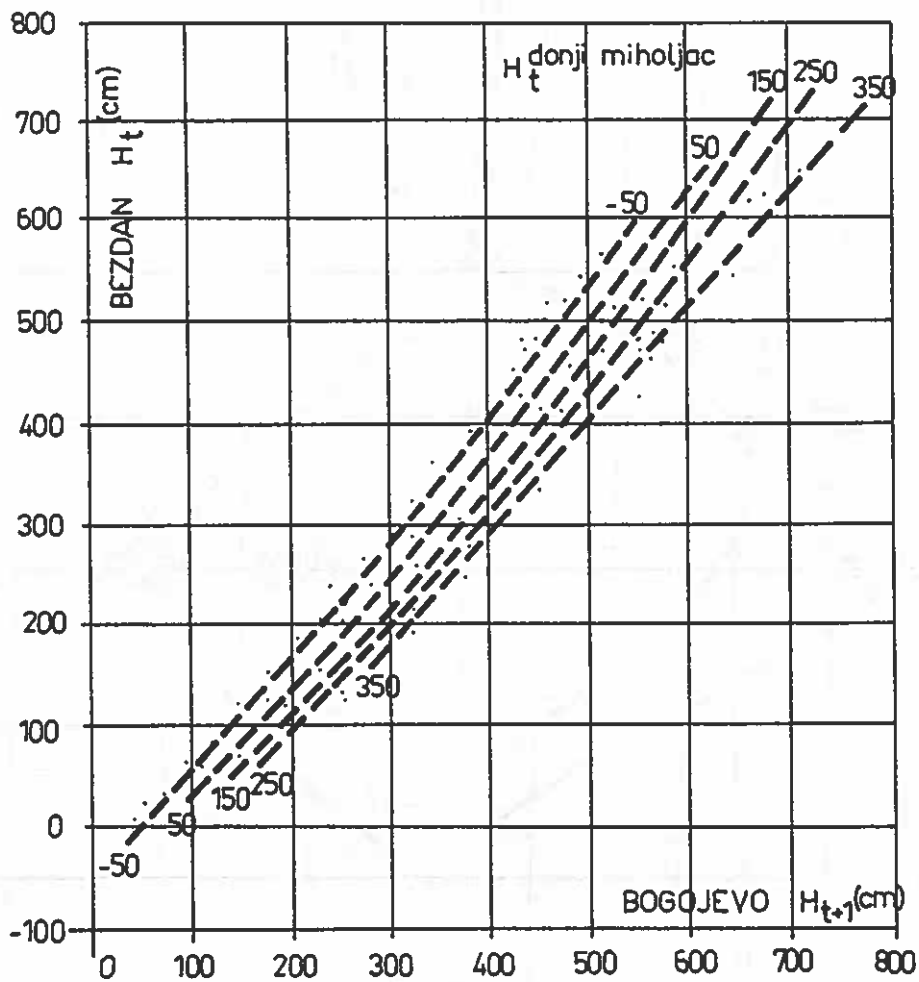




Рис. 2. Зависимость  $K_{D_i} = f(Q_{Bez.})$

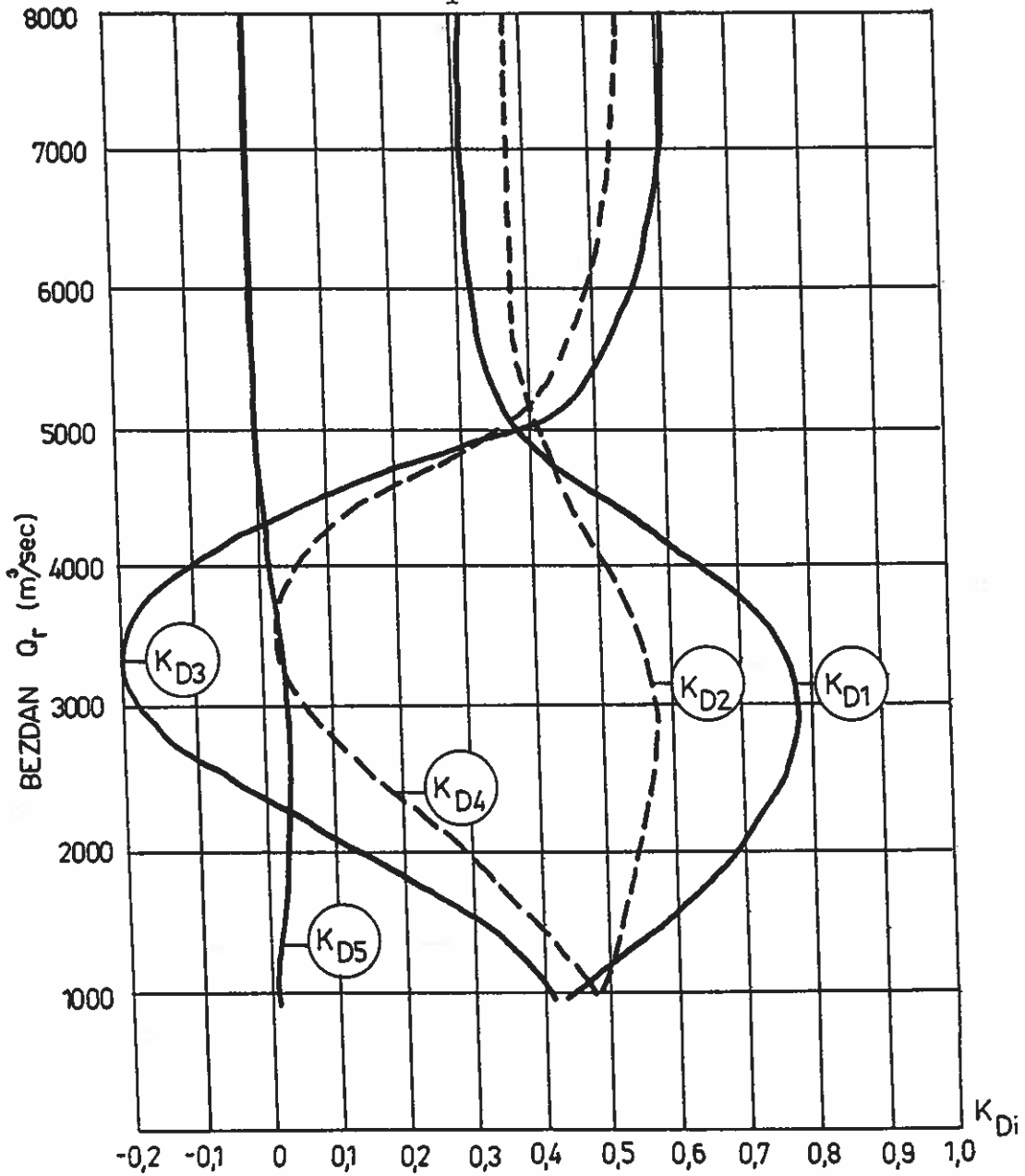


Рис. 3. Зависимость  $(\sum \theta)_{\min}$  необходимой для появления плавучего льда на Дунае у г.Бездана от температуры воды и уровня воды

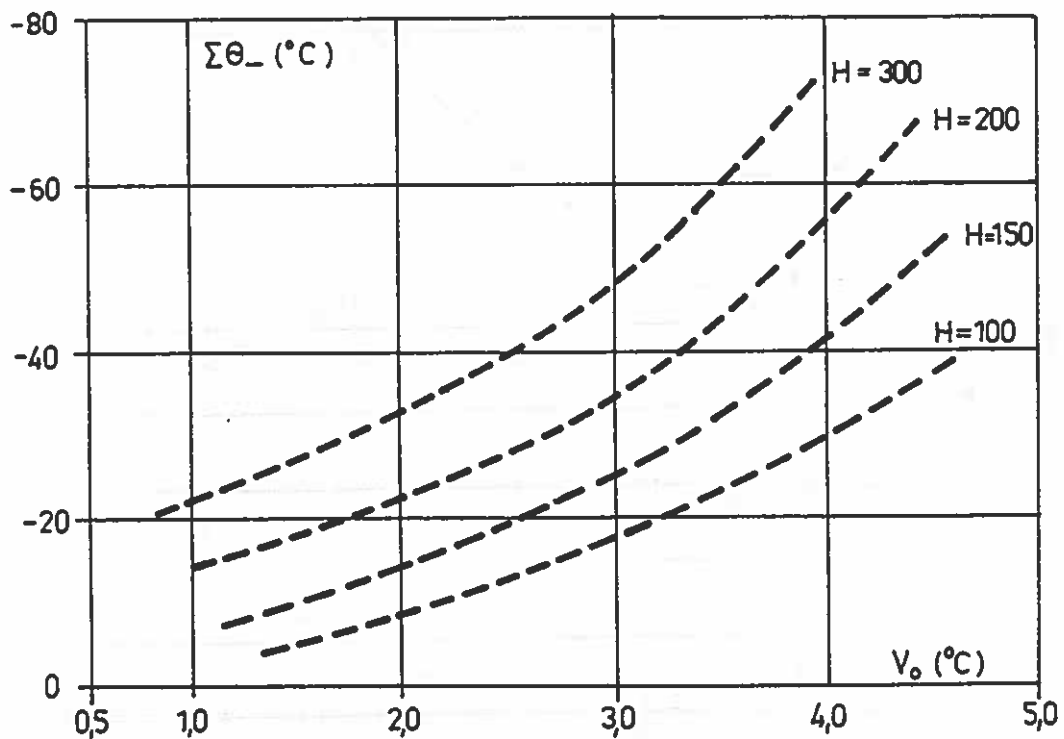
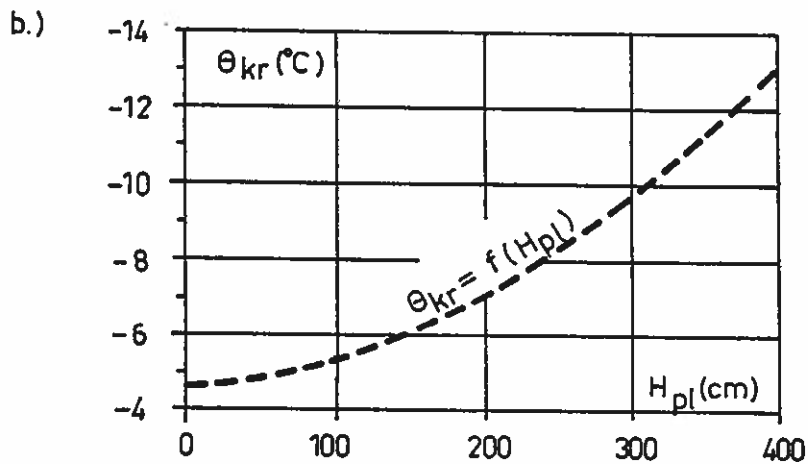
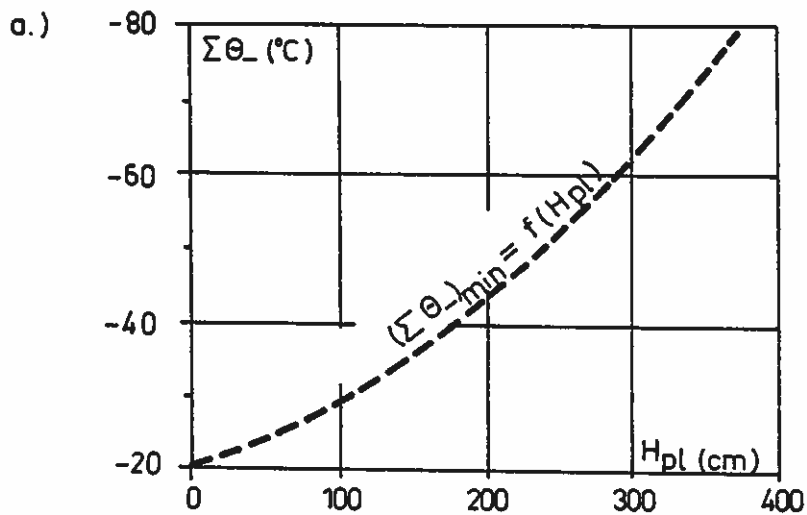


Рис. 4. Зависимость  $(\sum \theta_-)_{\min}$  необходимой для установления ледостава на р. Дунае у В.П. Бездан:  
 а) от критической температуры воздуха  $\theta_{kr}$   
 б) от уровня воды в день появления плавучего льда



#### 4.1.2.6. в Республике Болгарии

##### Информация относительно методов составления краткосрочных гидрологических прогнозов уровня реки Дунай для нужд судоходства.

Оперативные 48-часовые гидрологические прогнозы для нужд судоходства в общем болгаро-румынском участке реки Дунай издаются ежедневно УППД - Русе для водосточных станций Русе (км 495,600) и Силистра (км 375,500). В этих же станциях еженедельно издаются семидневные гидрологические прогнозы ожидаемого низкого и высокого уровня.

Прогнозирование водного уровня исключительно затруднительно, ввиду отсутствия достаточной и своевременной информации о режиме работы ГЭС "Железные Ворота I и II". Его влияние на степень колебаний уровня является доминирующим при слабом притоке воды в общем болгаро-румынском участке реки, что выражено наиболее отчетливо на гидрометрической станции Ново Село (км 833,600).

Особенно неблагоприятны для судоходства в периоды мелководья суточные колебания уровня, так как в некоторых случаях различие между отчетами уровня утром в 8.00 часов и среднесуточный уровень воды превышает 50-60 см. Они не могут включиться в определение 24 часовых различий уровня воды, т.е. создают предпосылки появления ошибок в прогнозе уровня реки.

##### Двухдневный прогноз водного уровня у гидрометрической станции Русе (км 495,600).

Для составления двухдневных прогнозов уровня реки у гидрометрической станции Русе найдены линейные зависимости между 24 часовыми различиями уровня воды у гидрометрических станций Ново Село (км 833,600), Лом (км 743,300), Оряхово (км 678,000), Свиштов (км 554,300) и Русе (км 495,600).

Для нахождения линейной зависимости посредством метода наименьших квадратов использованы уровни воды периода от 1 января 1988 г. до 31 августа 1990 г.

Использование данных за более длинный период не приводит к лучшим результатам ввиду обстоятельства, что более длинный период связан с большим неблагоприятным влиянием режима работы гидроцентралей на режим уровня воды в низких участках.

Описание метода.

По методу наименьших квадратов найдены отдельные линейные зависимости между уровнями воды у Ново Села за вторые сутки и у Оряхова за первые сутки.

Для первых суток зависимость следующая:

коэффициенты "а" имеют следующие значения:

| Н         | а(о)   | а(1)  | а(2)  |
|-----------|--------|-------|-------|
| 600       | 0,024  | 0,328 | 0,657 |
| 400 - 599 | -0,402 | 0,462 | 0,461 |
| 200 - 399 | 0,125  | 0,436 | 0,565 |
| 199       | -0,388 | 0,432 | 0,538 |

Для вторых суток зависимость в виде:

| Н         | в(о)   | в(1)  | в(2)   | в(3)  |
|-----------|--------|-------|--------|-------|
| 700       | 0,203  | 0,199 | 0,240  | 0,973 |
| 500 - 699 | -1,272 | 0,292 | -0,197 | 0,633 |
| 300 - 499 | 0,204  | 0,224 | -0,026 | 0,519 |
| 299       | -0,311 | 0,186 | 0,094  | 0,444 |

Где:

- прогнозирование 24 часовой разницы уровня воды того у Русе;
- 24 часовое различие уровня воды у Ново Село в день издания прогноза;
- тоже для Лома;
- тоже для Оряхова;
- тоже для Свиштова;
- уровень воды у Оряхова в день прогнозирования;
- тоже для Ново Село.

Двухдневный прогноз уровня реки Дунай у станции Силистра (км 375,500).

Здесь найдена линейная зависимость между 24 часовыми различиями уровня воды у станций Оряхово (км 678,000), Свиштов (км 554,300), Русе (км 495,600) и Силистра (км 375,500). Используются данные уровня воды также за период от 1 января 1988 г. до 31 августа 1990 г.

Для первых суток зависимость следующая:

| Н         | а(0)   | а(1)   | а(2)  |
|-----------|--------|--------|-------|
| 600       | -0,348 | 0,083  | 0,716 |
| 400 - 599 | 0,120  | 0,152  | 0,629 |
| 200 - 399 | -0,114 | 0,221  | 0,599 |
| 199       | 0,689  | -0,205 | 0,968 |

Для вторых суток:

| Н         | в (о)  | в (1) | в (2)  | в (3) |
|-----------|--------|-------|--------|-------|
| 600       | 0,593  | 0,293 | -0,055 | 0,551 |
| 400 - 599 | -0,545 | 0,494 | -0,303 | 0,603 |
| 200 - 399 | -0,039 | 0,390 | 0,057  | 0,366 |
| 199       | -0,114 | 0,332 | 0,347  | 0,165 |

4.1.2.7. в Румынии.

см. пункты 4.2.1.7. и 4.2.2.7.

4.1.2.8. в Союзе Советских Социалистических Респу-  
блик.

см. пункт 4.1.1.8.

4.2. Прогнозы расходов воды

4.2.1. Методы долгосрочных прогнозов расходов воды  
Дуная

4.2.1.1. в Федеративной Республике Германии.

см. пункт 4.1.2.1.

4.2.1.2. в Австрийской Республике.

см. пункт 4.1.1.2.

4.2.1.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Рес-  
публике.

см. пункт 4.1.1.3.

#### 4.2.1.4. в Венгерской Республике.

##### Досрочный прогноз весеннего стока на реках Дунай и Тисса.

Государственная служба гидропрогнозов.  
Научно-исследовательский центр водного хозяйства (ВИТУКИ). Будапешт.

Прогнозирование основано на линейных регрессионных зависимостях двух, трех или четырех переменных между количеством снеготазпасов в конце зимы (HVT), количеством так называемых потенциальных снеготазпасов (POT), т.е. количеством снеготазпасов определенной высотной зоны водосбора и стоком за определенный период (L) или максимальным уровнем воды (H). В качестве дальнейших переменных фигурируют количество осадков за данный период (C) и сумма положительных температур (T).

Установленные зависимости основаны на данных о стоке для весенних месяцев, максимальных уровнях воды, снеготазпасах, измеряемых 1 марта и 1 апреля, потенциальных снеготазпасах, осадках и суммах положительных температур воздуха для периода 1965-1982 гг., в створах р. Дунай-Братислава, Дунай-Будапешт, Тисса-Сегед (из-за отсутствия достаточного объема данных о снеготазпасах для створа Тисса-Сегед использовались данные за период 1967-1982 гг.). Были определены месячные значения и суммы за весенний период (III+IV+V, III+IV, IV+V).

Анализировались линейные регрессионные уравнения четырех, трех и двух переменных для всех возможных вариантов (для отдельных месяцев, для сумм месяцев). Целью данного анализа явился выбор тех прогностических зависимостей, по которым при данных условиях получают наилучшие результаты, поэтому определялись разницы между фактическими и расчетными значениями стока (максимальных уровней воды), полученных по прогностическим зависимостям четырех, трех и двух переменных для весенних месяцев периода 1965-1982 гг. В целях нахождения наилучших прогностических зависимостей, т.е. зависимостей,



результатирующих наименьшие отклонения месячного объема стока (или максимальных уровней воды), рассматривались расчетные ряды, полученные по зависимостям, начиная от наиболее простых до наиболее сложных, содержащих значения потенциальных снеготазпасов, осадков и суммы положительных температур.

Ниже проводилось тщательное рассмотрение разниц между фактическими и расчетными данными. Были определены погрешности расчетных значений гидрологических элементов за период 1965-1982 гг., а также средние значения, средние квадратические отклонения погрешностей, среднее арифметическое абсолютных значений и максимальные положительные и отрицательные отклонения (в размерностях км<sup>3</sup> и м).

Путем анализа ряда погрешностей отдельных прогностических схем определялись наилучшие прогностические уравнения для объема весеннего стока и для максимальных уровней воды, т.е. уравнения, характеризующиеся наименьшим квадратическим отклонением, средней ошибкой и интервалом погрешностей.

В ходе анализа выбирались прогностические уравнения линейной регрессии 2-х и 4-х переменных для определения весеннего стока и максимальных уровней воды рек Дуная и Тиссы для максимального и минимального объемов исходных данных. Полный объем информации (максимальный набор исходных данных) означает наличие сведений об объеме снеготазпасов к концу зимы (к 1 марту и 1 апрелю), а также ожидаемое количество осадков и ожидаемая сумма положительных температур воздуха. При неполном объеме информации располагаем лишь объемом снеготазпасов, а в прогностических уравнениях в качестве ожидаемых значений осадков и суммы температур фигурируют их средние многолетние значения.

Прогностические уравнения объема весеннего стока (L) и максимальных уровней воды (H) для створов Братислава и Будапешт водосбора Дуная и для створа г.Сегед бассейна Тиссы принимают вид

$$L, H = a + b \text{HVT} + c \text{POT}_{0-1500} + d \text{POT}_{0-1000} + e \text{POT}_{500-2000} + f \text{POT}_{1000-2000} + g \text{POT}_{1500-2000} + h C_{III} + i T_{III} + j C_{IV} + k T_{IV} + l C_{III+IV} + m T_{III+IV} + n C_V + o T_V + p C_{III+IV+V} + q T_{III+IV+V} + r C_{IV+V} + s T_{IV+V}$$

где L - объем весеннего стока (км<sup>3</sup>); H - максимальный уровень воды (M); HVT - полный объем снеготазпасов для водосбора 1 марта или 1 апреля (км<sup>3</sup>); POT<sub>h<sub>1</sub>-h<sub>2</sub></sub> - объем снеготазпасов 1 марта в высотной зоне h<sub>1</sub>÷h<sub>2</sub> (км<sup>3</sup>); H<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> - границы высотной зоны (м над уровнем моря); C<sub>t</sub> - ожидаемое количество осадков за указанные месяцы t (мм); t= III, IV, V - март, апрель, май; T<sub>t</sub> - суммы положительных температур за месяц(ы) t (над сут); a, b, c...s - постоянные.

Подробные значения постоянных (параметров регрессии), а также средние квадратичные отклонения отдельных гидрологических элементов, их средние многолетние значения и аномалии, а также их процентные значения от многолетней средней приведены для прогностических уровней весеннего стока и максимальных уровней для выпуска прогнозов 1 марта и 1 апреля для створов Братислава и Будапешт (р. Дунай) и Сегед (р. Тисса) в таблицах указанной работы (Hirling, 1984).

В таблицах также приведены уравнения при максимальных и минимальных объемах информации для выпуска прогнозов весеннего стока и максимальных уровней 1 марта и 1 апреля в основных створах (Братислава, Будапешт, Сегед) рек Дунай и Тисса.

Наиболее достоверные прогнозы весеннего стока и максимального уровня половодья получены для тех случаев, когда кроме значения снегозапасов известны и достоверные прогностические значения осадков и температуры воздуха за весну.

Для территории Венгрии и окружающей территории, то есть для бассейна Тиссы имеются сезонные и месячные долгосрочные прогнозы, выпускаемые Венгерской метеорологической службой и Гидрометцентром СССР, которые теоретически создают необходимые исходные данные для выпуска гидрологических прогнозов. Однако проверка долгосрочных прогнозов указывает на то, что лишь в 20% всех случаев получаются одновременно хорошие прогнозы двух метеорологических элементов.

Отсутствуют долгосрочные метеорологические прогнозы для верхнего участка бассейна Дуная на территории Баварии и Австрии, поэтому для створов Братислава и Будапешт прогнозы выпускаются по уравнениям с минимальным объемом данных или поставляя средние многолетние значения метеорологических элементов.

Прогнозные зависимости основаны на коротких рядах гидрометеорологических элементов, поэтому необходимо подчеркнуть, что по мере накопления новой информации целесообразно попытаться уточнить существующие зависимости.

#### Литература

Hirling, Gy.: Tavasszal várható lefolyási viszonyok hosszúidejű előrejelzése. Vizügyi Közlemények, 1984/4.

4.2.1.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии.

См. пункт 4.1.2.5.

4.2.1.6. в Республике Болгарии.

См. пункт 4.1.2.6.

4.2.1.7. в Румынии.

Методы долгосрочного прогноза средних расходов на реке Дунай - К.Мочорницэ,

В.Ал.Стэнеску, А.Нода, В.Лупу.

Институт метеорологии и гидрологии, Бухарест, Румыния.

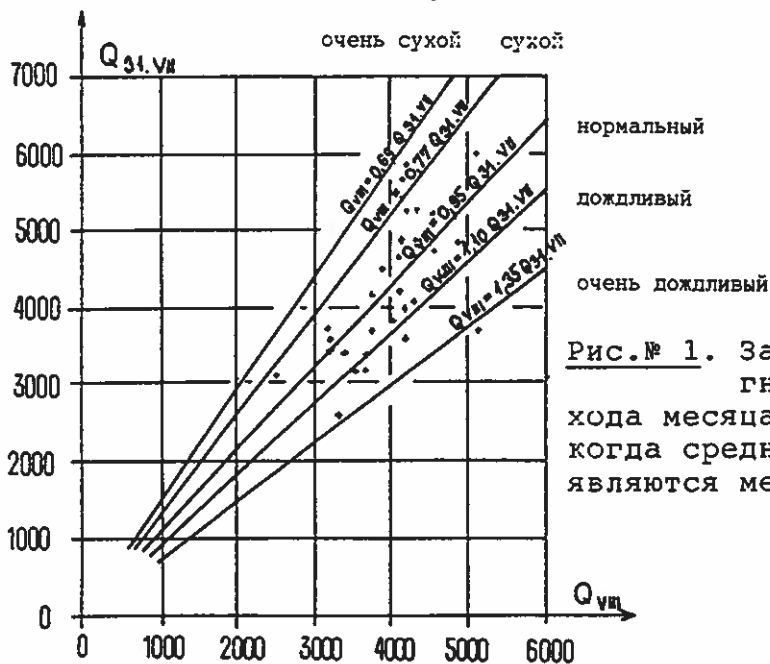
Средний расход является одним из гидрологических параметров, который должен прогнозироваться на более длительный период, как например, неделя, декада или месяц. В настоящем материале мы попытались разработать два простых, быстрых и приемлемых, с точки зрения вероятности, метода прогноза среднего месячного расхода на р. Дунай, на участке при входе на румынскую территорию у Железных Ворот.

Первый метод основывается, главным образом, на метеорологическом прогнозе для прогнозируемого месяца, метод, который считается правильным, по крайней мере с качественной точки зрения, а также на закон истощения воды бассейна. Таким образом, метеорологический прогноз должен будет показывать, по крайней мере, общий характер осадков (очень сухой, сухой, нормальный, дождливый, очень дождливый) и температур водосборного бассейна, что является возможным теперь. Этот последний аспект температур является особенно интересным для зимних и весенних месяцев, когда надо отделить внимание данным о снежном покрове и о возможностях его таяния.

Что касается закона уменьшения запасов воды бассейна, он характеризуется избытком воды этого запаса, рассматриваемым с глобальной точки зрения и выраженным средним расходом предыдущего месяца, а также значением расхода, рассмотренным в качестве исходного пункта для кривой истощения, и соответственно средним суточным расходом последнего дня предыдущего месяца или первого дня месяца, для которого разрабатывается прогноз.

Исходя из этих соображений, на гидрометрической станции Оршова на р. Дунай, где располагают непосредственными данными с 1838 г., были реализованы корреляции для каждого месяца между средними суточными расходами последнего дня одного месяца (на ординате) и средними месячными расходами следующего месяца (на абсциссе). Эти корреляции были установлены для разных этапов среднего месячного расхода, зарегистрированного за предыдущий месяц. Графические корреляции основываются на распределении точек в поле для случаев очень дождливых, дождливых, нормальных, сухих и очень сухих месяцев.

На рисунке № 1 представлены корреляции, составленные для августа в том положении, когда средние расходы на июль являются между 4501-5500 м<sup>3</sup>/сек.



Для облегчения вычислений все эти соотношения были представлены под образом прямых, которые проходят через происхождение. Надо уточнить, что самое низкое значение расхода было  $1300 \text{ м}^3/\text{сек.}$ , 28 февраля 1958 г.

Очень большой период и довольно верные значения расходов, которыми располагали на гидрометрической станции Оршова, предоставляют приемлемый уровень вероятности этим соотношениям. Впоследствии анализа распределения точек, принадлежащих последним 15-20 годам, когда были наибольшие использования в бассейне, надо отметить, что можно заметить определенное влияние на установленные соотношения.

Надо подчеркнуть тот факт, что для зимних-весенних месяцев надо осуществить более подробный анализ толщины снежного покрова, возможностей его таяния в зависимости от прогнозируемых температур, а также возможного притока впоследствии возможных осадков, чтобы иметь возможность установить ожидаемый режим осадков данного месяца.

На таблице № 1 представляются значения коэффициентов регрессии уравнений, установленных за каждый месяц, а также показания, относящиеся к более слабому качеству отдельных коррелятивных соотношений зависимо от количества точек, которые стали исходными точками для определения этих соотношений. Таким образом для ступеней среднего месячного расхода (предыдущего месяца), для которых это число меньше, чем 2, соотношения были установлены, имея также в виду точки, принадлежащие смежным ступеням.

Общие указания статистических данных нормальных, сухих и дождливых месяцев могли бы быть представлены на графике, от чего мы отказались, имея в виду объем настоящего материала.

Исходя из этого представления, получается, что степень достоверности прогноза непосредственно связана со степенью точности метеорологического прогноза, т.е. если метеорологический прогноз не осуществляется, невозможно говорить об осуществлении гидрологического прогноза и таким образом о беспристрастном суждении о приемлемости метода.

В качестве примера на таблице № 2 представлены значения среднемесячных расходов, вычисленных в 1986 г. (год, который не был принят в счет при вычислении соотношений), а также прогнозируемые значения на основе метеорологического прогноза и его осуществления.

Надо отметить, что не располагая осуществленными метеорологическими данными, реализованное метеорологическое положение было характеризовано, принимая в счёт колебания многолетних средних месячных расходов, а также колебания расходов по отношению к предыдущему месяцу. Характеризовать месяцы как сухие, нормальные, дождливые и т.п. на основе зарегистрированных метеорологических данных (по сравнению с многолетними значениями) для представительных станций верхнего и среднего бассейна р. Дунай - это, конечно, могло бы довести до более объективных характеристик, но мы считаем, что принятые критерии устраняют ложные выводы.

Надо отметить относительно небольшие ошибки в случае рассмотрения осуществленных значений по отношению с прогнозируемыми значениями на основе реализованного метеорологического положения ( $\pm 10\%$ ) и более крупные ошибки, если имеем в виду среднемесячные расходы, прогнозируемые на основе метеорологического прогноза ( $\pm 40\%$ ), который по объективным причинам был менее точным за несколько месяцев. В большом масштабе, имея в виду экстренные ситуации метеорологических прогнозов для очень сухого месяца вместо очень дождливого месяца, значения по отношению с осуществленной ситуацией могут различаться более, чем на 100%. Но, как мы уже отметили, подобные обстановки не могут приниматься во внимание при оценке метода, который основывается на реализованных метеорологических прогнозах.

Этот метод был использован в настоящем материале сугубо локально, но его можно использовать на любой гидрометрической станции, которая располагает долгосрочными данными, а также данными, относящимися к другим периодам, как например, неделя, декада и т.д. Во

всяком случае, использование метода на более краткие периоды может вести к существенному улучшению прогноза, имея в виду большие возможности достоверности метеорологического прогноза, а также возможность использовать гидрометрические записи вверх от данной станции.

Второй применяемый метод состоит в использовании кривых вероятности средних месячных расходов, зависящих от данных значений суточного расхода в начале месяца.

Метод является следующим:

Считается средним месячным расходом  $Q$ , которая включает две составляющие:

$$Q = Q^* + Q_S \quad (1)$$

где:  $Q^*$  - это среднемесячный расход в гипотезе, что в бассейне р. Дунай не появляется в течение месяца никакой приток дождевой воды и/или приток, происходящий от таяния снега.

$Q_S$  - это объем воды, проникающей в русло в период одного месяца, впоследствии притока дождевой воды или воды, происходящей от таяния снега.

$$\bar{Q}^* = \frac{Q_0}{\mathcal{L}} (1 - e^{-\mathcal{L}T}) \quad (2)$$

где:  $Q_0$  - средний суточный расход в начале месяца,  
 $T$  - продолжительность в днях данного месяца,  
 $\mathcal{L}$  - коэффициент показательной зависимости, которая выражает истощение запасов воды бассейна  $Q(t)$ :

$$Q(t) = Q_0 e^{-\mathcal{L}t} \quad (3)$$

Безусловно, что для данного месяца средний расход  $\bar{Q}$  зависит от  $Q_0$ , а также от  $Q_S$ . Тем более, расход образован дождевым притоком и/или притоком, который происходит от таяния снега,  $Q_S$  может быть прогнозирован только в качественных терминах, а именно:



- во время периода таяния снега  $Q_S$  зависит от запаса воды, происходящей от накопленного в бассейне снега, от температуры данного месяца (которая указывает процентное количество общего запаса снега, который растает и проникнет в гидрографическую сеть), от степени влажности почвы, а также от дождей, павших за этот период;

- в период июль-ноябрь  $Q_S$  зависит от количества осадков и от влажности почвы.

Легко сделать вывод, что имея в виду сложность способа снабжения гидрографической сети, детерминистическое моделирование перечисленных процессов невозможно. Впоследствии этого факта доля снежного или дождевого притока рассматривается как случайный элемент типа "шум", который накладывается соответственно зависимости (1) на средний расход  $Q^*$ , представлен функцией истощения (2) запасов воды, существующих в начале месяца, которая зависит от  $Q_0$ .

Таким образом, переменная  $\bar{Q}$  считается случайной, поскольку она подлежит статистическому распределению вероятности. Поскольку она находится в корреляции с переменной  $Q_0$ , можно провести кривую вероятности, обусловленную любым другим возможным значением  $Q_0$ .

Учитывая одномерные распределения расходов  $\bar{Q}$  и  $Q_0$  типа "Галтон" (лог - нормальные) определяются параметры обусловленной кривой вероятности следующим образом:

$$xy = \bar{x} + \xi_{xy} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - \bar{y}) \quad (4)$$

$$\sigma_{x/y} = \sigma_x \sqrt{1 - \xi_{x^2/y}} \quad (5)$$

где:  $\bar{x}_y$  - средняя величина линии лог  $\bar{Q}$ , обусловленная значением  $y = \log Q_0$ , выбранным произвольным способом;

$\bar{x}$  и  $\bar{y}$  - арифметические средние значения переменных  $x = \log \bar{Q}$  и  $y = \log Q_0$ ;

$\sigma_x$  и  $\sigma_y$  - средние квадратные отклонения этих переменных;

$\rho_{xy}$  - представляет собой коэффициент корреляции между  $x$  и  $y$ ;

$\sigma_{x/y}$  - квадратное отклонение переменной  $x$ , обусловленной данным значением  $y$ .

Зная величину и квадратное отклонение, т.е.  $\bar{x}_y$  и  $\sigma_{x/y}$  обусловленной кривой вероятности, можно вычислить эти кривые при помощи обычных таблиц интеграции нормального распределения.

На рисунках № 2 и 3 представлен пример обусловленных кривых вероятности превышения на апрель и октябрь. На таблице № 3 представлены значения параметров кривых вероятности зависимостей (4) и (5) для каждого месяца года.

Рис. № 2. Кривые обусловленной вероятности на апрель

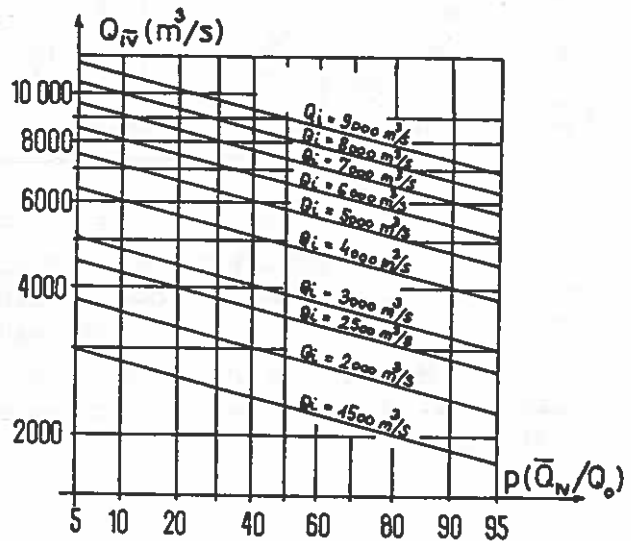


Рис. № 3. Кривые обусловленной вероятности на октябрь.

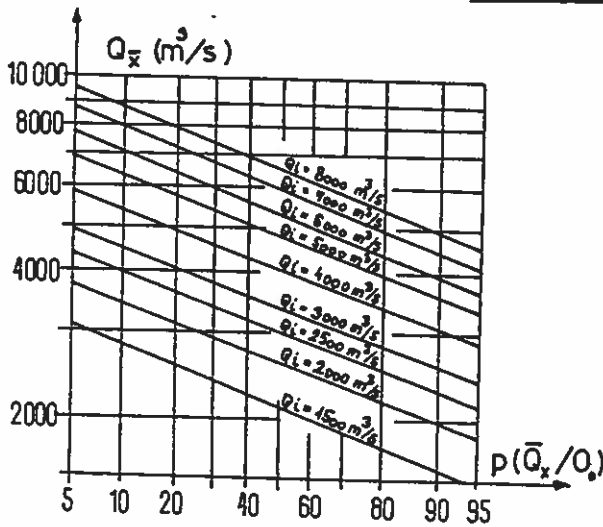


Таблица 3

|                | М Е С Я Ц Ы |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                | I           | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   |
| $\bar{X}$      | 3,62        | 3,66  | 3,70  | 3,87  | 3,87  | 3,81  | 3,75  | 3,63  | 3,58  | 3,58  | 3,65  | 3,66  |
| $\bar{y}$      | 3,62        | 3,61  | 3,70  | 2,84  | 3,88  | 3,85  | 3,78  | 3,66  | 3,60  | 3,55  | 3,60  | 3,67  |
| $\sigma_x$     | 0,188       | 0,161 | 0,13  | 0,126 | 0,116 | 0,110 | 0,114 | 0,119 | 0,128 | 0,145 | 0,162 | 0,169 |
| $\sigma_y$     | 0,215       | 0,200 | 0,191 | 0,137 | 0,127 | 0,126 | 0,116 | 0,130 | 0,134 | 0,159 | 0,175 | 0,182 |
| $\varphi_{xy}$ | 0,68        | 0,68  | 0,72  | 0,83  | 0,89  | 0,87  | 0,85  | 0,84  | 0,78  | 0,74  | 0,82  | 0,72  |

Подобная кривая используется следующим образом:

1. Зная исходный расход  $Q_0$ , выбирается кривая вероятности, параллельная с кривыми стандартных значений  $Q_0$  (например: 1500, 2000, 2500, 3000 м<sup>3</sup>/с и т.д.).
2. Исходя от прогностической метеорологической информации, выбирается вероятность превышения одного значения  $\bar{Q}$ .

В случае месяцев, когда снабжение, происходящее от снега, является значительным (март-май), для существенных запасов снежной воды в начале таяния, утвержденные метеорологическим прогнозом, который указывает температуры, превышающие нормальные значения, а также дожди сверх нормы, выбирается вероятность от 10% до 20%.

Иначе в случае незначительных снежных запасов, а тем более в случае прогноза холодного месяца с осадками под видом снега выбранная вероятность идет от 80% до 90%.

Например, для прогнозирования средних расходов на апрель мы располагаем следующими данными прогнозирования:

- Бассейн вполне покрыт снегом в начале месяца.
- Прогноз показывает средние температуры, которые превышают нормы, а также нормальное количество осадков.
- Суточный расход 31 марта  $-Q = 6250 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

В этих условиях будем выбирать  $p(\bar{Q}/Q_0) = 20\%$  и получим соответственно рисунку № 2

$$\bar{Q} = 7700 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

В случае месяцев с преобладающим дождевым снабжением, вероятность от 20% до 40% показывает метеорологический прогноз сверхнормального дождевого режима, а вероятность от 60% до 80% показывает убыточный период.

Является очевидным, что для любого другого сочетания температур и осадков с целью прогнозирования и, учитывая их распространение в бассейне Дуная (верхний или средний участок), будут выбраны значения обусловленной вероятности в соответствии с их детерминистическими влияниями.

Выбор этих вероятностей зависит от уровня опыта гидролога-прогнозиста и, конечно, от использования этого метода на более длительный период.

Таблица № 1

Коэффициенты уменьшения уравнений,  
использованных для прогноза средних  
месячных расходов р. Дунай на участке  
входа на румынскую территорию

| №<br>п/п | Месяц | Средний расход<br>предыдущего<br>месяца | Метеорологический прогноз месяца |                   |                   |                   |                    |
|----------|-------|---|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|          |       |   | очень<br>сухой                   | сухой             | норма-<br>льный   | дождливый         | очень<br>дождливый |
| 1        | 2     | 3                                       | 4                                | 5                 | 6                 | 7                 | 8                  |
| 1.       | I     | 1800 - 2500                             | 0,62 <sup>x</sup>                | 0,77 <sup>x</sup> | 0,98 <sup>x</sup> | 1,46 <sup>x</sup> | 2,12 <sup>x</sup>  |
| 2.       |       | 2501 - 3000                             | 0,62 <sup>x</sup>                | 0,77              | 0,98              | 1,46              | 2,12 <sup>xx</sup> |
| 3.       |       | 3001 - 3600                             | 0,62 <sup>x</sup>                | 0,77 <sup>x</sup> | 0,98 <sup>x</sup> | 1,46 <sup>x</sup> | 2,12 <sup>x</sup>  |
| 4.       |       | 3601 - 4500                             | 0,57 <sup>x</sup>                | 0,77              | 0,98              | 1,30              | 2,12 <sup>x</sup>  |
| 5.       |       | 4501 - 5500                             | 0,57 <sup>x</sup>                | 0,75 <sup>x</sup> | 0,93              | 1,25              | 1,70               |
| 6.       |       | 5501 - 6500                             | 0,57 <sup>x</sup>                | 0,75              | 0,93              | 1,25              | 1,70 <sup>x</sup>  |
| 7.       |       | 6501 - 8000                             | 0,50 <sup>x</sup>                | 0,70              | 0,83              | 1,16              | 1,53 <sup>x</sup>  |
| 8.       |       | 8001 - 10000                            | 0,50 <sup>x</sup>                | 0,70 <sup>x</sup> | 0,83 <sup>x</sup> | 1,16 <sup>x</sup> | 1,53 <sup>x</sup>  |
| 9.       | II    | 1800 - 2500                             | 0,77 <sup>x</sup>                | 1,02              | 1,42              | 1,83              | 2,76 <sup>x</sup>  |
| 10.      |       | 2501 - 3000                             | 0,77 <sup>x</sup>                | 1,02 <sup>x</sup> | 1,42 <sup>x</sup> | 1,83 <sup>x</sup> | 2,76 <sup>x</sup>  |
| 11.      |       | 3001 - 3600                             | 0,62                             | 0,85              | 1,12              | 1,53              | 2,70 <sup>x</sup>  |
| 12.      |       | 3601 - 4500                             | 0,62 <sup>x</sup>                | 0,85              | 1,12              | 1,53              | 2,63 <sup>x</sup>  |
| 13.      |       | 4501 - 5500                             | 0,62 <sup>x</sup>                | 0,85              | 1,02              | 1,37              | 2,08 <sup>x</sup>  |
| 14.      |       | 5501 - 6500                             | 0,62 <sup>x</sup>                | 0,82              | 1,02              | 1,37              | 2,08 <sup>x</sup>  |
| 15.      |       | 6501 - 8000                             | 0,57 <sup>x</sup>                | 0,70 <sup>x</sup> | 0,90 <sup>x</sup> | 1,06 <sup>x</sup> | 1,28 <sup>x</sup>  |
| 16.      |       | 8001 - 10000                            | 0,57 <sup>x</sup>                | 0,70 <sup>x</sup> | 0,90 <sup>x</sup> | 1,06 <sup>x</sup> | 1,28 <sup>x</sup>  |
| 17.      | III   | 1800 - 2500                             | 0,83 <sup>x</sup>                | 1,18              | 1,03              | 2,38              | 3,11 <sup>x</sup>  |
| 18.      |       | 2501 - 3000                             | 0,83 <sup>x</sup>                | 1,18 <sup>x</sup> | 1,03 <sup>x</sup> | 2,38 <sup>x</sup> | 3,11 <sup>x</sup>  |
| 19.      |       | 3001 - 3600                             | 0,83 <sup>x</sup>                | 1,10              | 1,35              | 1,75              | 2,50 <sup>x</sup>  |
| 20.      |       | 3601 - 4500                             | 0,77 <sup>x</sup>                | 0,97              | 1,20              | 1,55              | 2,50 <sup>x</sup>  |
| 21.      |       | 4501 - 5500                             | 0,77 <sup>x</sup>                | 0,97              | 1,20              | 1,55              | 2,50 <sup>x</sup>  |
| 22.      |       | 5501 - 6500                             | 0,77 <sup>x</sup>                | 0,90              | 1,07              | 1,32              | 1,80               |
| 23.      |       | 6501 - 8000                             | 0,75 <sup>x</sup>                | 0,90              | 1,03              | 1,20              | 1,43               |
| 24.      |       | 8001 - 10000                            | 0,70 <sup>x</sup>                | 0,90 <sup>x</sup> | 1,09 <sup>x</sup> | 1,33 <sup>x</sup> | 1,60 <sup>x</sup>  |
| 25.      | IV    | 3601 - 4500                             | 0,70 <sup>x</sup>                | 0,90 <sup>x</sup> | 1,09 <sup>x</sup> | 1,33 <sup>x</sup> | 1,60 <sup>x</sup>  |
| 26.      |       | 4501 - 5500                             | 0,70 <sup>x</sup>                | 0,90              | 1,09              | 1,33              | 1,53               |
| 27.      |       | 5501 - 5500                             | 0,70                             | 0,90              | 1,08              | 1,21              | 1,46               |
| 28.      |       | 6501 - 8000                             | 0,70                             | 0,90              | 1,08              | 1,18              | 1,38               |
| 29.      |       | 8001 - 10000                            | 0,70                             | 0,90              | 1,08              | 1,18              | 1,38               |
| 30.      |       | 3600 - 4500                             | 0,80                             | 0,90              | 1,00              | 1,25              | 1,40               |
| 31.      |       | 4501 - 5500                             | 0,80                             | 0,90              | 1,00              | 1,16              | 1,40               |
| 32.      |       | 5501 - 6500                             | 0,75                             | 0,90              | 0,98              | 1,14              | 1,40               |

Продолжение таблицы 1

| 1   | 2  | 3            | 4                 | 5                 | 6                 | 7                 | 8                 |
|-----|----|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 33. | У  | 6501 - 8000  | 0,75              | 0,90              | 0,98              | 1,12              | 1,28              |
| 34. |    | 8001 -10000  | 0,71              | 0,81              | 0,92              | 1,06              | 1,25              |
| 35. |    | 10001 -13700 | 0,71 <sup>x</sup> | 0,70              | 0,86              | 0,92              | 1,02 <sup>x</sup> |
| 36. | У1 | 3600 - 4500  | 0,80 <sup>x</sup> | 0,90 <sup>x</sup> | 1,03              | 1,18 <sup>x</sup> | 1,40 <sup>x</sup> |
| 37. |    | 4501 - 5500  | 0,80 <sup>x</sup> | 0,90 <sup>x</sup> | 1,02 <sup>x</sup> | 1,15 <sup>x</sup> | 1,33 <sup>x</sup> |
| 38. |    | 5501 - 6500  | 0,72 <sup>x</sup> | 0,82              | 0,95              | 1,10              | 1,26 <sup>x</sup> |
| 39. |    | 6501 - 8000  | 0,72 <sup>x</sup> | 0,82              | 0,92              | 1,04              | 1,21              |
| 40. |    | 8001 -10000  | 0,68              | 0,77              | 0,86              | 0,98              | 1,21              |
| 41. |    | 10001 -13300 | 0,68 <sup>x</sup> | 0,77              | 0,84              | 0,92              | 1,05 <sup>x</sup> |
| 42. | УП | 3000 - 3600  | 0,80 <sup>x</sup> | 0,90 <sup>x</sup> | 0,97 <sup>x</sup> | 1,11 <sup>x</sup> | 1,27 <sup>x</sup> |
| 43. |    | 3601 - 4500  | 9,80 <sup>x</sup> | 0,90              | 0,97              | 1,11              | 1,27 <sup>x</sup> |
| 44. |    | 4501 - 5500  | 0,65              | 0,80              | 0,94              | 1,08              | 1,27              |
| 45. |    | 5501 - 6500  | 0,65              | 0,75              | 0,85              | 0,95              | 1,11 <sup>x</sup> |
| 46. |    | 6501 - 8000  | 0,65              | 0,75              | 0,85              | 0,95              | 1,10 <sup>x</sup> |
| 47. |    | 8001 -10000  | 0,62              | 0,71              | 0,80              | 0,90              | 1,07              |
| 48. |    | 10001 -13700 | 0,62 <sup>x</sup> | 0,70 <sup>x</sup> | 0,80 <sup>x</sup> | 0,87 <sup>x</sup> | 0,95 <sup>x</sup> |
| 49. | УШ | 3000 - 3600  | 0,69 <sup>x</sup> | 0,82 <sup>x</sup> | 0,95              | 1,10              | 1,35 <sup>x</sup> |
| 50. |    | 3601 - 4500  | 0,69 <sup>x</sup> | 0,82              | 0,95              | 1,10              | 1,35              |
| 51. |    | 4501 - 5500  | 0,69              | 0,77              | 0,95              | 1,10              | 1,35              |
| 52. |    | 5501 - 6500  | 0,64 <sup>x</sup> | 0,76              | 0,86              | 1,00              | 1,25              |
| 53. |    | 6501 - 8000  | 0,64 <sup>x</sup> | 0,77              | 0,85              | 0,99              | 1,16 <sup>x</sup> |
| 54. |    | 8001 -10000  | 0,56 <sup>x</sup> | 0,69              | 0,84              | 0,97              | 1,10 <sup>x</sup> |
| 55. | 1X | 2501 - 3000  | 0,67 <sup>x</sup> | 0,83 <sup>x</sup> | 0,99 <sup>x</sup> | 1,10 <sup>x</sup> | 1,33 <sup>x</sup> |
| 56. |    | 3001 - 3600  | 0,67 <sup>x</sup> | 0,83              | 0,99              | 1,16              | 1,34 <sup>x</sup> |
| 57. |    | 3601 - 4500  | 0,64              | 0,80              | 0,95              | 1,14              | 1,41              |
| 58. |    | 4501 - 5500  | 0,64              | 0,80              | 0,95              | 1,08              | 1,41              |
| 59. |    | 5501 - 6500  | 0,64 <sup>x</sup> | 0,80              | 0,95              | 1,21              | 1,41              |
| 60. | X  | 1800 - 2500  | 0,81 <sup>x</sup> | 1,03 <sup>x</sup> | 1,22 <sup>x</sup> | 1,50 <sup>x</sup> | 1,90 <sup>x</sup> |
| 61. |    | 2501 - 3000  | 0,81              | 1,03              | 1,22              | 1,50              | 1,90              |
| 62. |    | 3001 - 3000  | 0,68              | 0,85              | 1,10              | 1,38              | 1,83              |
| 63. |    | 3601 - 4500  | 0,65              | 0,82              | 1,03              | 1,25              | 1,57              |
| 64. |    | 4501 - 5500  | 0,65              | 0,78              | 0,95              | 1,08              | 1,40 <sup>x</sup> |
| 65. |    | 5501 - 6500  | 0,65              | 0,75              | 0,90              | 1,05              | 1,40 <sup>x</sup> |
| 66. |    | 1506 - 3000  | 0,65 <sup>x</sup> | 0,75 <sup>x</sup> | 0,90 <sup>x</sup> | 1,05 <sup>x</sup> | 1,40 <sup>x</sup> |
| 67. | X1 | 2000 - 2500  | 0,78 <sup>x</sup> | 1,03              | 1,25              | 1,62              | 2,02 <sup>x</sup> |
| 68. |    | 2501 - 3000  | 0,78 <sup>x</sup> | 0,95              | 1,15              | 1,39              | 1,75 <sup>x</sup> |
| 69. |    | 3001 - 3600  | 0,78 <sup>x</sup> | 0,95              | 1,15              | 1,39              | 1,73              |
| 70. |    | 3601 - 4500  | 0,75              | 0,93              | 1,14              | 1,35              | 1,70              |
| 71. |    | 4501 - 5500  | 0,68              | 0,86              | 1,06              | 1,30              | 1,70              |
| 72. |    | 5501 - 6500  | 0,68 <sup>x</sup> | 0,85              | 1,06              | 1,30              | 1,70              |
| 73. |    | 6501 - 8000  | 0,68 <sup>x</sup> | 0,85 <sup>x</sup> | 1,06 <sup>x</sup> | 1,30 <sup>x</sup> | 1,70 <sup>b</sup> |
| 74. | XП | 1800 - 2500  | 0,75 <sup>x</sup> | 0,93 <sup>x</sup> | 1,08 <sup>x</sup> | 1,29 <sup>x</sup> | 1,77 <sup>x</sup> |
| 75. |    | 2501 - 3000  | 0,75              | 0,93              | 1,08              | 1,29              | 1,77              |
| 76. |    | 3001 - 3600  | 0,75              | 0,93              | 1,08              | 1,29              | 1,75              |
| 77. |    | 3601 - 4500  | 0,66              | 0,86              | 1,07              | 1,29              | 1,75              |
| 78. |    | 4501 - 5500  | 0,66              | 0,82              | 0,95              | 1,10              | 1,30              |
| 79. |    | 5501 - 6500  | 0,66              | 0,80              | 0,93              | 1,10              | 1,30              |
| 80. |    | 6501 - 8000  | 0,65 <sup>x</sup> | 0,80              | 0,92              | 1,10              | 1,30 <sup>x</sup> |
| 81. |    | 8001 -10000  | 0,57 <sup>x</sup> | 0,63              | 0,75              | 0,88              | 1,02              |

Примечание: \*) это информативное качество нотации.  
Средний месячный расход данного месяца ( $Q_0$ )  
вычисляется при помощи уравнения

$$Q_0 = KQ_i$$

где:  $Q_i$  - средний суточный расход последнего дня  
предыдущего месяца;

$K$  - коэффициент уменьшения, принятый для  
ступени среднего расхода предыдущего  
месяца, и положение метеорологического  
прогноза данного месяца.

Таблица 2

| № п/п | Месяц    | Q исходный м3/с | Q средний предыдущего месяца | Метеорологический прогноз | Гидрологический прогноз | Реализованное метеорологическое положение. | Гидрологический прогноз для реального метеорологического положения. м3/с | Средний реализованный расход м3/с | Ошибки по отношению к прогнозируемому метеорологическому положению % | Ошибки по отношению к реальному метеорологическому положению % |
|-------|----------|-----------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|--|--|-----------------------------------|--|--|
| 1.    | Январь   | 4.500           | 4.300                        | сухой                     | 3.470                   | дождливый                                  | 5.850  | 5.700                             | 39   | -3   |
| 2.    | Февраль  | 7.700           | 5.700                        | нормал.                   | 7.850                   | сухой                                      | 6.310  | 6.100                             | -29  | -3   |
| 3.    | Март     | 6.400           | 6.100                        | нормал.                   | 6.850                   | нормальный                                 | 6.850  | 7.100                             | 4  | 4  |
| 4.    | Апрель   | 9.300           | 7.100                        | нормал.                   | 10.050                  | нормальный                                 | 10.050   | 9.100                             | -10  | -10  |
| 5.    | Май      | 8.550           | 9.100                        | нормал.                   | 7.870                   | сухой                                      | 6.930  | 7.200                             | -9   | 4  |
| 6.    | Июнь     | 6.050           | 7.200                        | сухой                     | 4.960                   | дождливый                                  | 6.290  | 6.900                             | 28   | 9  |
| 7.    | Июль     | 6.450           | 6.900                        | нормал.                   | 5.480                   | сухой                                      | 4.840  | 5.150                             | -6   | 6  |
| 8.    | Август   | 4.550           | 5.150                        | нормал.                   | 4.320                   | сухой                                      | 3.500  | 3.200                             | -35  | -9   |
| 9.    | Сентябрь | 3.100           | 3.200                        | нормал.                   | 3.070                   | нормальный                                 | 3.070  | 3.100                             | 1  | 1  |
| 10.   | Октябрь  | 2.650           | 3.100                        | нормал.                   | 2.570                   | сухой                                      | 2.250  | 2.200                             | -17  | -2   |
| 11.   | Ноябрь   | 2.950           | 2.200                        | сухой нормал. дождлив.    | 4.230                   | сухой                                      | 3.040  | 3.000                             | -41  | -1   |
| 12.   | Декабрь  | 2.500           | 3.000                        | нормал.                   | 2.700                   | сухой                                      | 2.330  | 2.600                             | -4   | 10   |



4.2.1.8. в Союзе Советских Социалистических Рес-  
публик.

См. пункт 4.1.1.8.

4.2.2. Методы краткосрочных прогнозов расходов воды Ду-  
ная:

4.2.2.1. в Федеративной Республике Германии.

См. пункт 4.1.2.1.

4.2.2.2. в Австрийской Республике.

а) Ежедневный прогноз расхода воды.

Прогноз уровней воды, изложенный под пунктом 4.1.2.2-а для водомерного поста Вена-Рейхсбрюкке на Дунае, может каждый раз быть выражен в расход воды на основании кривой распределения при соответствующем учете канала Дуная и нового Дуная.

б) Прогноз расходов воды при высоких уровнях составляется Гидрографической службой Верхней Австрии в Линце частично по расходам Шердинг/Инн и Линц/Дунай и частично по уровня воды Ибс/Дунай (см. п. 4.1.2.2-б).

Гидрографическая служба Нижней Австрии в Вене пользуется моделью бассейнов с многочисленными ступенями, причем модель "АРИМА" выполняет проверочные функции. Эта модель позволяет составлять прогнозы уровней воды сроком на 6 часов по водомерному посту Вены-Рейхсбрюкке на Дунае. В связи со строительством гидроузла Грейфенштейн возникла необходимость в адаптации, измерении модели в результате не представляется возможным предоставить в данный момент сведения о погрешностях или уточнения.

4.2.2.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Респу-  
блике.

См. пункт 4.1.1.3.

4.2.2.4. в Венгерской Республике.

См. пункт 4.2.1.4.

4.2.2.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии.

См. пункт 4.1.2.5.

4.2.2.6. в Республике Болгарии.

См. пункт 4.1.1.6.

4.2.2.7. в Румынии.

Оперативная процедура "DANUBIUS AMONT" для прогноза расходов вод Дуная на участке входа в водохранилище "Железные Ворота I" - д-р инж. В.Ал.Стенеску, В.Унгуряну, инж. Ч.Корбуш. Институт метеорологии и гидрологии, Бухарест, Румыния.

Резюме

Оперативная процедура для прогноза, которая здесь предлагается - DANUBIUS AMONT - позволяет ежедневную разработку прогноза расходов вод Дуная на участке входа в водохранилище "Железные Ворота I" с опережением в 1-7 дней. Эта процедура включает две модели распространения типа линейной передаточной функции, метод восстановления распространенных расходов и ряд операционных методов прогноза с целью установления векторов предвиденных на 7 дней расходов в створах предсказания, которые являются входами в модель распространения.

Проведенные эксперименты доказали, что эта процедура дает хорошие результаты, если она применяется в реальном масштабе времени, особенно, что касается первых пяти дней прогноза.

## Введение

Чтобы реализовать оптимальную эксплуатацию гидроэнергетической и навигационной системы "Железные Ворота I и II", а также для ежедневной разработки, с опережением в 1-7 дней, прогноза уровней и расходов воды Дуная на румынском участке вниз надо знать каждый день с тем же опережением, каковы расходы при входе в водохранилище "Железные Ворота I".

С этой целью надо сначала установить прогнозируемые расходы для того же промежутка времени, для ряда предсказывающих станций, находящихся на Дунае и на его притоках. Впоследствии эти векторы прогнозируемых расходов распространяются последовательно на участках Дуная его притоках Драва, Тисса, Сава, Тимеш, Морава и Нера, используя математическую модель типа линейной передаточной функции, получая таким образом вектор прогнозируемых расходов на 7 дней на участке входа в водохранилище "Железные Ворота I" в схематическом узле Панчево. Этот гипотез схематизации основывается на том факте, что входные расходы в водохранилище "Железные Ворота I" представляют сумму расходов, которые вошли через его верхний конец, а также по его контуру.

### 1. Нынешняя информационная система измерения, передачи и накопления гидрометеорологических данных

Наблюдение за метеорологической и гидрологической эволюцией, а также разработка гидрологического прогноза реализуется, исходя из данных, предоставленных:

- 79 гидрометрическими станциями верхнего и среднего бассейна Дуная,
- 56 гидрометрическими станциями на Дунае и на его главных притоках на верхнем и среднем бассейне,
- станциями национальной гидрометеорологической сети в бассейнах притоках Тиссы и ее гидрографической зоны - Банат.

## 2. Модель вычисления распространения расходов на Дунае.

### 2.1. Алгоритм модели.

Для распространения расходов на характеристических створах реки используется линейная модель, которая основывается на применении теории систем для изучения процесса распространения 1.

2.2. Калибровка (эталонирование) модели распространения.

Имея в виду структуру гидрографической сети Дуная и его главных притоков, была реализована схема сочетания паводков или топологическое моделирование - соответственно которой распространение гидрографа расходов реализуется последовательно от одного участка к другому на Дунае, а также на его притоках. Для каждого участка (рис. № 1) дается длина  $L$  (км) и у каждого главного узла отмечается площадь надлежащего водосборного бассейна  $F$  (км<sup>2</sup>).

Промежуток времени с суточными расходами 1980-1987, а также 1970, 1972 и 1975 гг., когда были зарегистрированы существенные паводки на Дунае и/или на его притоках, был выбран в качестве представительного промежутка времени, использованного для калибрования.

Чтобы определить оптимальные параметры  $x$  и  $k$  модели распространения, была использована программа вычисления ПРОПАГ, которая вызывает файл, включающей ежегодные гидрографы (ежегодные расходы) на период калибрования при 16 гидрометрических станциях, т.е. Будапешт, Мохач, Бездан, Богоево и Панчево на Дунае, Дони Михоляц на Драве, Сегед и Сэнта на Тиссе, Сл.Брод и Ср.Митровица на Саве, Добой на Босне, Зворник на Дрине, Шаг на Тимише, Любичевски Мост на Великой Мораве, Нэйдаш на Нере.

## 3. Метод восстановления распространённых расходов.

Для использования в реальном масштабе времени модели диффузии надо разработать метод восстановления, который, основываясь на зарегистрированных ошибках между

имитированными расходами и расходами, зарегистрированными в момент до разработки прогноза на гидрометрической станции вниз, может внести поправку имитированных расходов, во время всего периода прогноза.

Использованный метод восстановления применяется иным способом для восходящей и нисходящей ветвей имитированного гидрографа на гидрометрической станции вниз 1.

#### 4. Определение векторов прогнозируемых расходов на 7 дней в рамках створов предсказания.

Вычисления прогнозирования реализуются, рассчитывая на следующие створы предсказания: Будапешт на Дунае, Сегед на Тиссе, Брод на Саве, Добой на Босне, Зворник на Дрине, Шаг на Тимеше, Любичевски Мост на Великой Мораве и Нэйдаш на Нере (рис. № 1).

На вышеупомянутых станциях предсказаний прогноз с опережением в 7 дней реализуется на основе следующих методов.

##### 4.1. Метод градиента вычитания (метод тенденции).

Расходы, зарегистрированные в промежуток прогноза, получают, вычитывая каждый день из расхода, зарегистрированного в день разработки прогноза, значения градиента вычитания  $\Delta Q$ , полученный следующей зависимостью:

$$\Delta Q = \frac{Q^A}{B} + C \quad (1)$$

На таблице № 1 представлены значения параметров  $A$ ,  $B$  и  $C$ , полученные в результате корреляций, установленных при всех станциях предсказания.

#### 4.2. Метод многомерной линейной регрессии.

Общая зависимость прогноза расхода  $Q^{(A)}$  для створа А с опережением  $\Delta t$  следующая:

$$Q_{t+\Delta t}^{(A)} = K_A \cdot Q_t^{(A)} + \sum_{i=1}^m K_i Q_t^{(i)} + C \quad (2)$$

где:  $m$  - представляет общее число створов, находящихся на главной реке и на притоках;

$Q^{(i)}$  - расходы на створах  $i$ ;

$K_A$  и  $K_i$  - коэффициенты регрессии;

$C$  - свободный термин;

$t$  - момент разработки прогноза.

На таблице № 2 представляется значение этих коэффициентов.

#### 4.3. Метод передаточной функции.

Этот метод используется для прогноза расходов на гидрометрической станции предсказания в Будапешт -  $Q(BUD)$ , используя расходы гидрометрической станции в Братиславе -  $Q(BRT)$ , т.е.:

$$Q_{t+\Delta t}^{(BUD)} = \sum_{\tau=1}^n Q_{t+\Delta t-\tau}^{(BRT)} \cdot r(\tau) \quad (3)$$

где:  $\Delta t$  - средняя продолжительность расходов между Братиславой и Будапештом;

$t$  - момент разработки прогноза;

$n$  - общее число ординат для промежутка одного дня и номер передаточной функции типа Poisson -  $r(\tau)$ , полученной в результате зависимости 2:

$$r(\tau) = \frac{\tau^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\tau} \quad (4)$$

Принимая в счет только расходы  $Q_t^{(BRT)}$ ,  $Q_{t-1}^{(BRT)}$ ,  $Q_{t-2}^{(BRT)}$  и  $Q_{t-3}^{(BRT)}$  принимается следующая упрощенная зависимость предсказания:

$$Q_{t+2}^{(BUD)} = 1,36 \sum_{\mu=2}^5 Q_{t+2-\mu}^{(BRT)} \cdot r(\mu) \quad (5)$$

#### 4.4. Объемный метод.

В случае разных створов, находящихся на меньших притоках, как например, Добой на Босне, Зворник на Дрине, Шаг на Тимеше, Любичевски Мост на Великой Мораве и Нэйдаш на Нере, можно прогнозировать волны паводка, основываясь на количестве осадков, зарегистрированном и/или прогнозированном.

Алгоритм вычисления следующий:

- определяется средний дождь в бассейне ( $\bar{h}$ ), основываясь на существующей информации о среднем количестве осадков и/или на прогнозированные осадки, и выбирается коэффициент стока ( $\mathcal{L}$ );

- определяется максимальный расход, используя следующую объемную зависимость:

$$Q_{\max} = \frac{\bar{h} \cdot \mathcal{L} \cdot F}{T_T \cdot \gamma} \quad (6)$$

где:  $F$  - площадь водосборного бассейна;

$T_T$  - общая средняя продолжительность гидрографа;

$\gamma$  - коэффициент формы паводка, который выбирается между 0,28-0,33 (меньшие значения относятся к дождям с большей интенсивностью).

Определяется средний расход каждого дня, умножая максимальный расход с процентуальной ординатой, которая соответствует данному дню (таблица № 3), и, слагая основной существующий расход, в моменте появления паводка.

\* \* \*

Процедура прогноза DANUBIUS AMONT была имитирована для периодов 25 марта - 1 июля 1987 г. и 23 марта - 1 мая 1988 г., которые считаются представительными, имея в виду, что они включают значительные паводки (до 12.400 м<sup>3</sup>/сек. у Панчево), в осуществлении которых бассейн содействовал вполне или частично. Полученные результаты хорошие и только в 20% случаев они превышают ошибки в  $\pm 5\%$  для опережения в 1 и 2 дня или в  $\pm 10\%$  в случае опережения в 3-5 дней. Для опережения в 6-7 дней ошибки являются большими, особенно в случае значительных паводков на реках Сава и Морава.

На рисунке № 2 представляются зарегистрированные и прогнозированные гидрографы на участке входа в водохранилище "Железные Ворота I" для опережений в 3 и 5 дней в периоде с 23.03. по 1.07.1987 г.



## ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАВИСИМОСТИ ГРАДИЕНТА ВЫЧИТАНИЯ

| Р е к а<br>Параметр | Дунай    | Драва           | Тисса | Сава  | Босна | Дрина   | Морава                  |
|---------------------|----------|-----------------|-------|-------|-------|---------|-------------------------|
|                     | Будапешт | Дони<br>Михолец | Сегед | Брод  | Лобой | Зворник | Любичев-<br>ски<br>Мост |
| А                   | 1,91     | 1,00            | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,47    | 1,63                    |
| В                   | 42,85    | 1,11            | 20,00 | 16,00 | 8,20  | 363,00  | 1,15                    |
| С                   | 0        | 88,00           | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 0       | 0                       |

Таблица 2

## ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ МНОГОРАЗМЕРНОЙ РЕГРЕССИИ

| Река   | Гидрометри-<br>ческая<br>станция | Использованные гидрометрические<br>станции |                   |                   |                   |                   |                  | C                 | $\Delta t$<br>(дни) |       |
|--------|----------------------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|-------|
|        |                                  | $K_A$ или $K_i, i = \overline{1,6}$        |                   |                   |                   |                   |                  |                   |                     |       |
|        |                                  | $K_A$                                      | $K_1$             | $K_2$             | $K_3$             | $K_4$             | $K_5$            |                   |                     | $K_6$ |
| Тисса  | Сегед                            | $\frac{SZ}{0,69}$                          | $\frac{SO}{0,31}$ | $\frac{AR}{0,19}$ | $\frac{SL}{0,59}$ | $\frac{OR}{0,59}$ | $\frac{Z}{0,59}$ | $\frac{CC}{0,59}$ | 26                  | 2     |
| Сава   | Брод                             | $\frac{BR}{0,71}$                          | $\frac{ZG}{0,44}$ | $\frac{BN}{0,61}$ |                   |                   |                  |                   | 9                   | 2     |
| Морава | Любичевски<br>Мост               |  | $\frac{CU}{0,88}$ |                   |                   |                   |                  |                   | 30                  | 1     |
| Драва  | Дони<br>Михоляц                  |  | $\frac{VZ}{0,77}$ | $\frac{GR}{0,81}$ |                   |                   |                  |                   | 100                 | 4     |
| Тимиш  | *<br>Шаг                         |  | $\frac{LG}{1,0}$  | $\frac{BT}{2,2}$  |                   |                   |                  |                   | -200                | 2     |

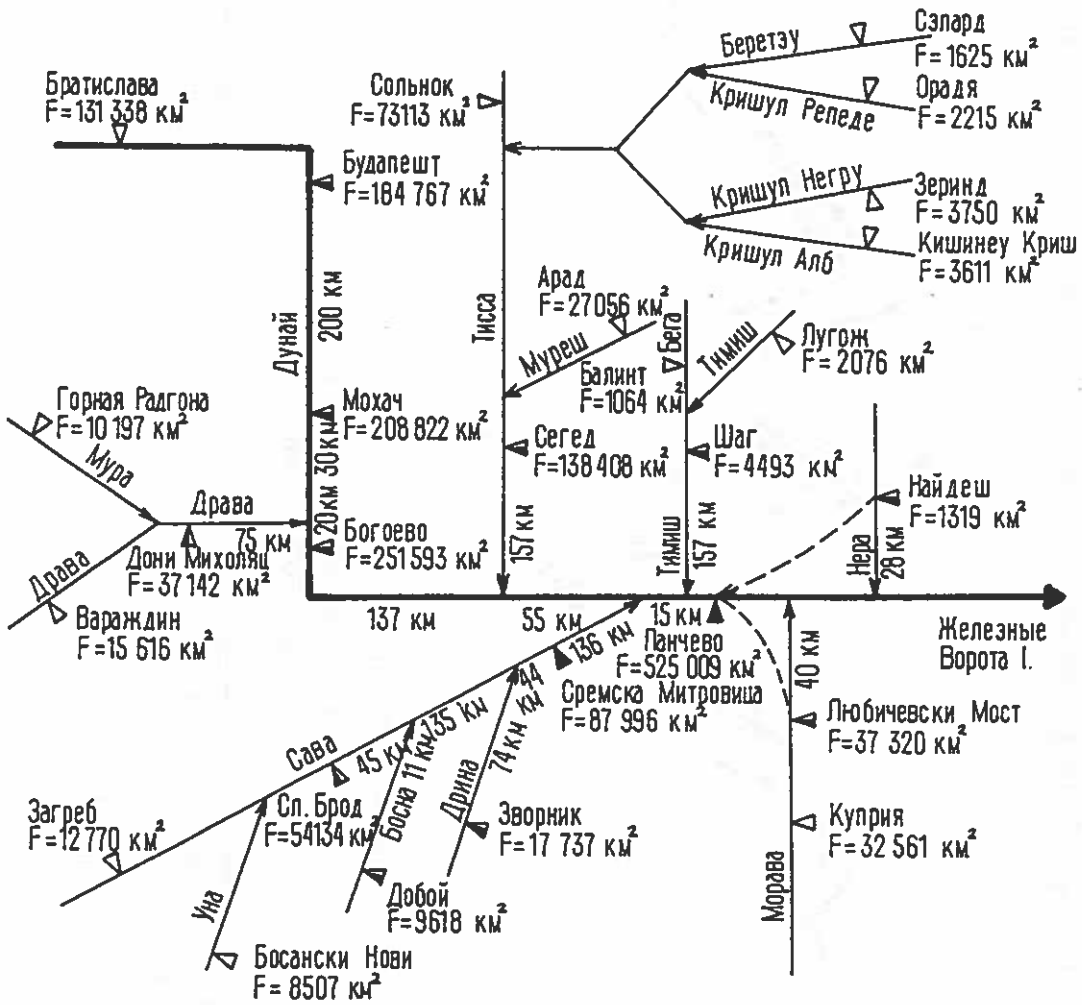
Символы использованных станций: SZ (Сегед), SO (Сольнок), AR (Арад), SL (Сэлард), OR (Орадя), Z (Зеринд), CC (Кишинеу Криш), BR (Брод), ZG (Загреб), BN (Босански Нови), CU (Куприя), VZ (Вараждин), GR (Горния Радгона), LG (Лугож), BT (Балинт).

\* Зависимость действительна для  $Q(LG) > 200 \text{ м}^3/\text{с}$ .  
Иначе:  $Q(\text{Шаг}) = Q(LG) + Q(BT)$

СУТОЧНЫЕ ОРДИНАТЫ ПАВОДКА ПО ОТНОШЕНИЮ К ЕГО МАКСИМАЛЬНОМУ  
РАСХОДУ

| Река   | День    |  | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   |
|--------|---------|--|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | Станция |  |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Босна  |         |  | 0 | 0,30 | 1,00 | 0,57 | 0,30 | 0,18 | 0,10 | 0,05 | 0,02 | -    | -    | -    | -    |
| Дрина  |         |  | 0 | 0,12 | 0,41 | 1,00 | 0,65 | 0,41 | 0,25 | 0,12 | 0,06 | 0,02 | -    | -    | -    |
| Тимиш  |         |  | 0 | 0,28 | 1,00 | 0,53 | 0,25 | 0,13 | 0,07 | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    |
| Морава |         |  | 0 | 0,13 | 0,35 | 0,66 | 0,89 | 1,00 | 0,93 | 0,79 | 0,63 | 0,46 | 0,29 | 0,15 | 0,05 |
| Нера   |         |  | 0 | 1,00 | 0,58 | 0,30 | 0,15 | 0,07 | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |

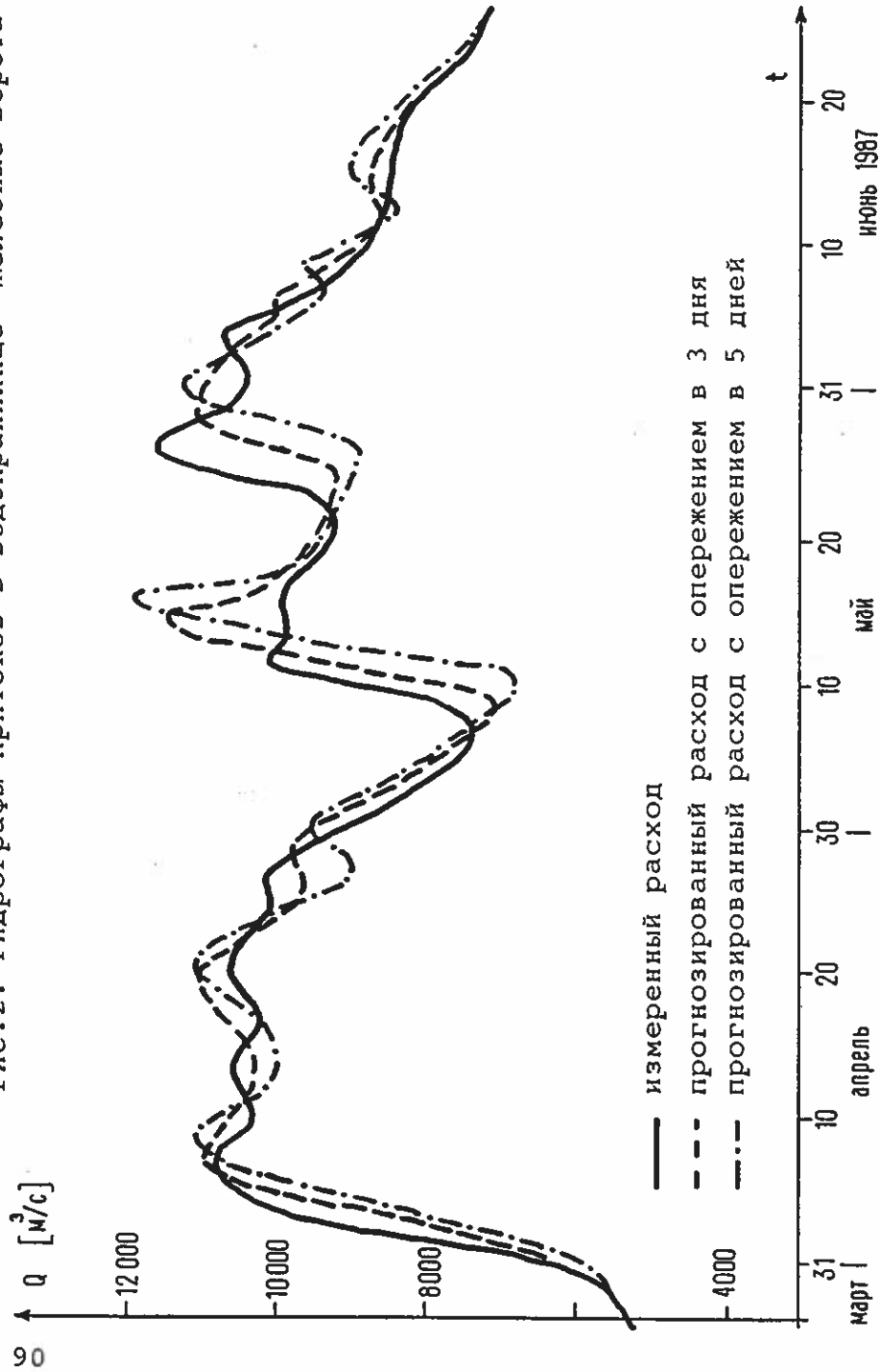
Рис. 1. Гидрометрические станции и схема вычисления использованного при разработке прогноза расходов воды р. Дунай у входа в водохранилище "Железные Ворота I"



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.

- ▽ - гидрометрические станции, использованные при прогнозе векторов расходов на гидрометрических станциях.
- ▼ - гидрометрические станции прогнозирования.
- ▼ - гидрометрические станции, где применяется процедура переактуализации имитированных расходов.

Рис. 2. Гидрографы притоков в водохранилище "Железные Ворота I"



Оперативная процедура DANUBIUS AVAL для гидрологических прогнозов на румынском участке р. Дунай -

- д-р инж. Т. Шербан, инж. Ч. Корбуш.

Институт метеорологии и гидрологии, Бухарест,  
Румыния.

Резюме.

Оперативная процедура для прогноза, которая здесь предлагается, DANUBIUS AVAL позволяет ежедневную разработку прогноза уровней и расходов вод Дуная на румынском участке реки с опережением в 1-7 дней. Эта процедура включает модель распространения, метод восстановления распространенных расходов и ряд операционных методов прогноза с целью установления векторов предвиденных на 7 дней расходов в створах предсказания, которые являются входами в модель распространения.

Проведенные эксперименты доказали, что эта процедура дает хорошие результаты, если она применяется в реальном масштабе времени, особенно что касается первых пяти дней прогноза.

Введение.

Повышенные требования ко все больше и больше разнообразным гидрологическим прогнозам впоследствии создания некоторых социальных и экономических объектов, работа которых непосредственно связана с режимом вод Дуная, а также традиционные требования судоходства и работ по защите от наводнений и ледовых явлений, заставили нас создать оперативную процедуру, которая позволила бы ежедневную разработку прогноза уровней и расходов воды на румынском участке р. Дунай с опережением в 1-7 дней.

По этим причинам сначала определяются для того же периода времени прогнозируемые выходные расходы ГЭС "Железные Ворота", а также, при помощи некоторых оперативных методов прогнозирования, прогнозируемые расходы для

станций предсказания, находящихся на румынских притоках Дуная. Впоследствии эти векторы прогнозируемых расходов распространяются последовательно на участках русла р. Дунай и его притоках Жиул, Олт, Арджеш, Яломица, Сирет, Бузау и Прут, получая таким образом расходы и уровни, прогнозированные на румынском участке Дуная.

## 1. Модель вычисления распространения расходов

### 1.1. Алгоритм модели.

Любой участок реки может рассматриваться как линейная система, где выход основывается на следующем дискретном уравнении:

$$Q_d(m) = \Delta t \sum_{i=p}^m Q_a(i) u_i(m-i+1), \quad m=1,2,\dots \quad (1)$$

$$p = \begin{cases} 1 & \text{если } m \leq n \\ m-n+1 & \text{если } m > n, \end{cases}$$

где:  $Q_d(m)$  - ордината для времени  $m\Delta t$  выходящего гидрографа данного участка реки,

$Q_a(i)$  - средний приток для периода  $[(i-1)\Delta t, i\Delta t]$ ;

$u_i(m-i+1)$  - ордината для времени  $(m-i+1)\Delta t$  ядерной функции системы для единичного импульса  $Q_a(i)$ , равномерно распространенного на интервал  $[(i-1)\Delta t, i\Delta t]$ ;

$n$  - число ординат ядерной функции

Ординаты ядерной функции  $u(j)$ ,  $j = 1, 2, \dots$ ,

$$u(j) = \begin{cases} 1 - \frac{k}{\Delta t} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{k(1-x)}} \right], & \text{для } j = 1 \\ \frac{k}{\Delta t} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{k(1-x)}} \right]^2 e^{-\frac{j\Delta t}{k(1-x)}}, & \text{для } j = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2)$$

## 1.2. Калибровка (эталонирование) модели распространения.

С целью калибровки модели распространения сначала было реализовано топологическое моделирование румынского участка р. Дунай. В разработке топологического моделирования были учтены гидрологические и геометрические характеристики русла р. Дунай, створов предсказания, где находятся гидрометрические станции Груя, Четате, Калафат, Бистрица, Бекет, Корабия, Турну-Мэгуреле, Зимница, Джурджу, Олтеница, Кэлэраши, Фетешть, Чернавода, Хыршова, Браила, Галац, Исакча и Тульча, а также слияние р. Дунай со своими шестью главными румынскими притоками Жиул, Олт, Арджеш, Яломица, Сирет и Прут.

Для каждого участка дается длина  $L$  (км) и в начале каждого главного узла отмечается площадь надлежашего водосборного бассейна  $F$  (км<sup>2</sup>).

Анализ поперечных разрезов, определенных с 1982 г. по 1987 г., показывает, что русло р. Дунай является относительно стабильным, что позволило осуществление некоторых многолетних кривых расхода, исходя из измерений расходов.

Расходы, которые стекли по рукавам Дуная, определяются при помощи коэффициентов распределения, которые представляют установленное отношение между расходом воды на данном рукаве и расходом воды всего Дуная.

Используя расходы, зарегистрированные в характерных годах: 1965, 1970, 1975 и 1980-1986 гг. - были определены оптимальные параметры  $x$  и  $k$  модели распространения при помощи метода TRIAL-AND-ERROR.

## 2. Метод восстановления распространённых расходов

Использованный метод восстановления применяется иным способом для восходящей и нисходящей ветви распространённой гидрограммы на гидрометрической станции вниз.



Зависимости восстановления следующие [2]:

$$Q_p(t+1) = Q_M(t) + [Q_S(t+1) - Q_S(t)] \cdot CP(t) \quad (3)$$

$$Q_p(t+n) = Q_p(t+n-1) + [Q_S(t+n) - Q_S(t+n-1)] \cdot CP(t+n-1), n = \overline{2,7}$$

Поправочные коэффициенты CP вычисляются следующим образом:

- для фазы увеличения гидрограммы

$$CP(t) = \left[ \frac{Q_M(t) - Q_M(t-2)}{Q_S(t) - Q_S(t-2)} \right]^{0,7} \quad (4)$$

$$CP(t+n) = [CP(t+n-1)]^{0,7}, \quad n = \overline{1,6}$$

- для фазы уменьшения гидрограммы

$$CP(t) = \frac{Q_M(t)}{Q_S(t)} \quad (5)$$

$$CP(t+n) = \frac{Q_p(t+n)}{Q_S(t+n)}, \quad n = \overline{1,6}$$

где:  $Q_M$ ,  $Q_S$  и  $Q_p$  - измеренные, имитированные и соответственно прогнозируемые расходы;

t - момент разработанного прогноза.

3. Определение векторов прогнозируемых расходов на 7 дней в рамках створов предсказания.

Вычисления прогнозов реализуются, рассчитывая на следующие створы предсказания на главных румынских притоках р. Дунай: Подаль на Жиул, Стоенешть на Олте, Будешть на Арджеше, Слобозиа на Яломице, Лунгочь на Сирете, Мэгуреле на Бузау и Оанча на Пруте.

На вышеупомянутых станциях прогноз с опережением в 7 дней реализуется на основе методов тенденций и объемного метода. [3]

#### 4. Исчисление ошибок прогноза.

Для исчисления ошибок прогноза используются как графические критерии, так и ряд числовых критериев, т.е.:

- а) средняя квадратная ошибка RMSE, зарегистрированная между измеренной и прогнозируемой гидрограммами с опережением  $n = 1,7$  дням:

$$RMSE_n = \sqrt{\frac{F}{N}} \quad (6)$$

$$F = \sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2 \quad (7)$$

где:  $Q_i$  - измеренный расход,  
 $\hat{Q}_i$  - прогнозируемый расход,  
 $F$  - резидуальное колебание,  
 $N$  - число значений расходов.

- б) с целью разработки универсального критерия, который не зависел бы от значения расходов и от длины серии значений, Нэш и Сатклайф реализовали сравнение между резидуальным колебанием  $F$  и исходным колебанием  $F_o$ :

$$F_o = \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 \quad (8)$$

где:  $Q$  - измеренные расходы.

Нэш и Сатклайф выразили это сравнение следующей зависимостью:

$$NTD_n = 1 - \frac{F}{F_o} \quad (9)$$

с) коэффициент автокорреляции  $r_1$ .

Чтобы подчеркнуть степень корреляции ошибок прогноза и сделать выводы, что касается возможности улучшения модели, используется коэффициент автокорреляции первой степени:

$$r_{1n} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

где:  $X_i = Q_i - \hat{Q}_i$

d) кривая частоты ошибок

Очень часто интересно получить отклонение  $N_n$  между измеренными уровнями  $N_i$  при  $n = 1,7$  дней опережения.

Эти числовые критерии могут быть представлены на таблицах или на графиках.

\*  
\*       \*  
\*

Впоследствии применения процедуры DANUBIUS AVAL для прогноза расходов и уровней на румынском участке Дуная мы доходим до нескольких важных выводов, т.е.:

- процедура дает хорошие результаты, если она применяется в реальном масштабе времени, особенно, что касается первых пяти дней прогноза;

- необходимо провести высококачественные гидрометрические работы, реализуя измерения расходов на разных этапах гидрологического режима, с целью узнать возможные изменения кривых расходов.

4.2.2.8. в Союзе Советских Социалистических Респу-  
блик.

См. пункт 4.1.1.8.

4.3. Прогнозы ледового режима

4.3.1. Методы долгосрочного прогноза появления льда  
на Дунае.

4.3.1.1. в Федеративной Республике Германии.

См. пункт 4.1.2.1.

4.3.1.2. в Австрийской Республике.

В Австрии не составляются долгосрочные прогнозы ледового режима.

См. пункт 4.1.1.2.

4.3.1.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Рес-  
публике.

См. пункт 4.1.1.3. (не составляются).

4.3.1.4. в Венгерской Республике.

Прогноз ледовых явлений на реках Дунай и  
Тисса.

Научно-исследовательский центр водного хо-  
зяйства, Будапешт - Д.Хирлинг.

1. Ледовые явления на реках

В зимние месяцы для климата Венгрии характерны отрицательные температуры и часто наблюдающиеся сильные и продолжительные заморозки. Из этого следует, что необходимо обращать внимание на разные формы ледовых явлений на наших реках и практику защиты от наводнений. В неблагоприятных условиях ледовые наводнения могут причинить большие ущербы народному хозяйству, поэтому прогноз их является важной практической задачей.

Осенью температура воздуха падает. Снижение температуры воздуха сопровождается падением температуры воды. Зимой за счет резких уменьшений температуры воздуха - при отрицательных температурах - ожидается появление льда на водотоках.

В зимнем периоде при различных метеорологических условиях образуются разные формы ледовых явлений на реках. После полного очищения ото льда в результате падения температуры воздуха на водотоках снова возникает ледоход. После ледостава образуется ледоход, после чего снова может образоваться ледостав. На реке Дунай часто встречаются безледовые зимы (Хорват, 1979).

Большая разнообразность ледового режима объясняется большим количеством факторов, влияющих на ледовые явления, и их изменчивостью.

В результате установления графических зависимостей между метеорологическими и гидрологическими элементами, а также нахождения параметров прогностических зависимостей, разработанных в СССР, было обеспечено предсказание следующих характеристик ледового режима:

- а) дата начала осенне-зимних ледоходов,
- б) дата начала ледостава,
- в) толщина льда,
- г) дата вскрытия льда,
- д) дата очищения ото льда.

## 2. Прогноз даты начала осенне-зимних ледоходов

### 2.1. Среднесрочный прогноз даты появления льда

В основу метода положена связь между следующими гидрометеорологическими элементами:

- а) необходимая сумма отрицательных (средних суточных) температур воздуха для ледообразования;
- б) температура воды в момент перехода температуры воздуха от положительных к отрицательным значениям (начальная температура воды), (Комаров, 1947; Шуляковский, 1947; Ласлоффи и Сестай, 1964; Ласлоффи и Сестай, 1965).

Учитывая вышесказанное, для рек Дунай и Тисса была определена связь - на различных участках этих рек - между необходимой суммой количества тепла для ледообразования и начальной температурой воды.

Для прогноза даты появления льда можно использовать следующие два метеорологических прогноза:

а) среднесрочный прогноз температуры воздуха для различных районов страны (3 - 4 дн.);

б) декадный метеорологический прогноз, в котором даются ожидаемые максимальные и минимальные температуры воздуха за сутки.

Прогноз даты появления льда производится с помощью ежедневного сопоставления суммы отрицательных температур воздуха, которая вычисляется с помощью уравнений, и прогнозируемой суммой отрицательных температур воздуха.

## 2.2. Краткосрочный прогноз даты начала осенне-зимних ледоходов

Краткосрочный прогноз даты начала ледохода составляется в том случае, если на основании декадного прогноза ожидается, что через несколько дней (в течение 4 дней) на определенном участке реки наступит ледоход. С помощью краткосрочного прогноза можно проверить и уточнить прогнозируемые даты среднесрочного прогноза.

Основным методом определения падения температуры воды является метод теплового баланса, который содержит сумму положительных (приход) и сумму отрицательных (расход) составляющих тепла (Штарополски, 1969; Ласлоффи и Сестаи, 1965; Шуляковский, 1960; Балашова, 1968).

Тепловой баланс поверхности воды за данный промежуток времени и при падении температуры воды описывается следующим образом:

$$\mathcal{L}(\bar{\Theta}_w - \Theta_{sw}) + B = 0 \quad (1)$$

где  $\bar{\theta}_w$  - средняя температура воды водотока в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\theta_{sw}$  - температура воды на поверхности в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\mathcal{L}$  - коэффициент теплоотдачи между атмосферой и водой в  $\text{дж}/\text{см}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \text{ сут}$ ;

$B$  - удельный теплообмен на границе в  $\text{дж}/\text{см}^2 \text{ сут}$ .

Учитывая, что температура воды на поверхности  $\theta_{sw} = 0$  и  $n$ -индекс характеризует дату наступления появления льда, получаем уравнение, которое определяет начальные условия ледообразования:

$$\mathcal{L}_n (\theta_w)_n \leq -B_n \quad \text{или} \quad (\theta_w)_n \leq -\frac{B_n}{\mathcal{L}_n} \quad (2)$$

Шуляковский (1960) разработал метод для прогноза даты появления льда, который был использован в дальнейших работах других авторов или усовершенствован некоторыми (например, Станчинова, 1973). Используя гидрологические данные постов на Дунае и Тиссе с помощью ЭВМ определили и использовали среднюю скорость течения и площадь зеркала воды различных участков реки для разных расходов воды.

Произведя грубые приближения, можно вычислить и сравнить обе части неравенства (2). В случае выполнения неравенства ожидается появление льда на реке на данном участке и в данный момент.

### 3. Прогноз даты начала ледостава

Прогнозирование даты начала ледостава выполняется после того, как на данном участке реки появился ледоход и, если ожидается, что температура воздуха в дальнейшем остается отрицательной и ожидается количественное увеличение плавающих льдин.

Шуляковский (1960) предлагает использовать следующие уравнения для вычисления отрицательного количества тепла и критической температуры, необходимых для формирования ледостава:

$$(\sum \theta_-)_A = -10.3 u^{1.22} b^{0.39} \quad (3)$$

$$\theta_{kr} = -0.65 u b^{0.5} \quad (4)$$

где  $u$  - средняя скорость течения реки в м/с,  
 $b$  - ширина створа в м.

С помощью формул Шуляковского (1960) были рассчитаны необходимые для формирования ледостава количество тепла и критическая температура для Дуная и Тиссы.

Относительно отрицательного количества тепла, необходимого для образования ледостава, получили, что уравнение Шуляковского (1960) выполняется для нижнего участка Дуная (Будапешт-Мохач) и не выполняется для верхнего участка реки (Братислава-Будапешт). Поэтому для верхнего участка рекомендуется использовать следующее уравнение:

$$(\sum \theta_-)_A = -17.48 u^{1.144} b^{0.428} \quad (5)$$

которое немного отличается от предлагаемого Шуляковским.

Для реки Тиссы уравнение Шуляковского можно применять без изменений.

Для вычисления критической температуры ледостава уравнение Шуляковского (1960) было преобразовано для реки Дуная в следующем виде:

$$\theta_{kr} = -0.423 u^{1.048} b^{0.476} \quad (6)$$

Для реки Тиссы уравнение Шуляковского рекомендуется использовать без изменений.

Прогноз даты начала ледостава состоит из вычисления относительного количества тепла и критической температуры, необходимых для образования ледостава, и сравнения этих данных с суммой ожидаемых суточных температур.



#### 4. Прогноз толщины льда

После образования ледостава при дальнейших отрицательных температурах воздуха увеличивается толщина льда. Ледяной покров увеличивается за счет потерь тепла водной массы через лед и снежный покров, покрывающий лед.

В этот период времени - в случае необходимости - можно давать прогноз ожидаемой в последующие дни толщины льда.

Исследователями, занимающимися этой темой, были разработаны многочисленные формулы для прогноза толщины льда на различных реках.

В издании WMO, Hydrological Forecasting Practicies, 1975 также приведены приближенные и используемые в практике формулы для прогноза толщины льда.

Для прогноза толщины льда в данных створах Дуная и Тиссы необходимо иметь следующие данные:

- а) начальную измеренную толщину льда ( $d_g$ ), в см;
- б) высоту снежного покрова на льду ( $d_s$ ), в см;
- в) плотность снега ( $\rho$ ), в кг/м<sup>3</sup>.

Кроме этих данных необходимо знать:

- а) ожидаемую среднюю температуру воздуха ( $\bar{\theta}$ ), в °С и
- б) заблаговременность прогноза температуры воздуха ( ), сут.

#### 5. Прогноз даты вскрытия льда

Вскрытие льда и полное очищение реки ото льда происходит за счет одновременно действующих термических и механических факторов, в то же время оказывающих разное воздействие. За счет термических воздействий происходит таяние, которое значительным образом снижает прочность льда. Под действием механических сил (паводочная волна) разрушается сплошной ледяной покров и создаются условия

для ледохода. Взаимодействие этих факторов в различных местах Земного шара проявляется по разному.

Реки Дунай и Тисса относятся к таким рекам, которые текут с севера на юг и, на которых - за исключением отдельных случаев - подвижка льда вызывается, в основном, термическим фактором. Ледоход и полное очищение ото льда являются сложными процессами, поэтому до сих пор ещё не существует надежного во всех отношениях и общего метода прогнозирования. Поэтому в настоящее время для прогноза даты вскрытия льда и полного очищения ото льда используются косвенные упрощенные и приближенные методы.

Нами был построен график с двумя переменными, на горизонтальной оси которого откладывалась сумма отрицательных температур воздуха от даты начала ледостава до установления положительных температур воздуха, а на вертикальной оси - сумма положительных температур воздуха от даты установления положительных температур до даты вскрытия реки. Через множество полученных точек были проведены прямая или парабола.

#### 6. Прогноз даты очищения ото льда

Через длительное время с положительными температурами воздуха реки полностью очищаются ото льда. Это очищение может происходить двумя путями. В первом случае сумма отрицательных температур не достигает того значения, которое необходимо для образования ледостава. В этом случае образуется только ледоход, который исчезает через некоторое время с положительными температурами воздуха. Во втором случае образуется ледостав, который после некоторого времени с положительными температурами воздуха вскрывается, начинается ледоход и в результате потепления реки полностью очищается ото льда.

Прогноз даты очищения ото льда выполняется следующим образом. После даты установления положительных температур воздуха определяется то количество отрицательных температур воздуха, которое складывается от первого дня

начала ледохода до даты установления положительных температур воздуха. С помощью этих данных по графику или уравнениям можно определить то количество тепла, которое необходимо для полного очищения ото льда. В дальнейшем это количество тепла сравнивается с суммой положительных фактических температур воздуха (суточных), наблюдаемых до даты выдачи прогноза, и суммой суточных температур воздуха, рассчитанных по прогнозу.

#### 7. Составление непрерывных суточных прогнозов ледовых явлений

С помощью методов, описанных в предыдущих главах, и используя математические аппараты, непрерывно и комплексно прогнозируются ледовые явления для отдельных участков рек Дунай и Тисса или для отдельных створов этих рек.

Непрерывность прогнозов ледовых явлений обозначает, что, начиная с 1 ноября, производится сбор и ежедневная обработка метеорологических и гидрологических данных и на основании фактических ледовых явлений регулярно 2 раза в неделю дается прогноз ледовых явлений. Сбор метеорологических и гидрологических данных производится до конца зимы (середины марта).

Комплексность прогнозов ледовых явлений состоит в том, что система прогнозов ледовых явлений дает возможность для прогнозирования разных ледовых явлений, зная форму ледового явления в данный момент.

В Государственной службе гидрологических прогнозов была разработана программа для ЭВМ для прогноза ледовых явлений. В этой программе были использованы вышеописанные методы.

Прогностические программы, которые сами по себе дают неплохие результаты, автоматически следуют друг за другом в логическом порядке, начиная от среднесрочного прогноза появления льда до программы, разработанной для прогноза даты очищения ото льда.

Прогнозы ледовых явлений выпускаются регулярно через 3-4 суток (2 раза в неделю), а в случае необходимости, при внезапном изменении погодных условий и ледовой обстановки, прогнозы выпускаются ежедневно. Также имеется возможность выпускать декадные прогнозы. Предсказание дат ледовых явлений (начало ледохода, установление ледостава, вскрытие и очищение реки) производится для следующих участков рек:

Дунай: Братислава-Комаром, Комаром-Будапешт, Будапешт-Дунафёльдвар, Дунафёльдвар-Мохач.

Тисса: Тисабеч-Вашарошнамень, Вашарошнамень-Токай, Тиссафюред-Сольнок, Сольнок-Сегед.

## ЧАСТОТА ВЫДАЧИ ПРОГНОЗОВ

| Участок рек<br>Дунай, Тисса   | В р е м я            |                          |                  |         | очистения<br>от льда |
|---|----------------------|--------------------------|------------------|---------|----------------------|
|   | осеннего<br>ледохода | наступления<br>ледостава | вскрытия<br>льда |         |                      |
| Братислава-Комаром<br>Комаром-Будапешт<br>Будапешт-Дунафёльдвар<br>Дунафёльдвар-Мохач | а, в, с              | а, в, с                  | а, в, с          | а, в, с | а, в, с              |
|   | а, в, с              | а, в, с                  | а, в, с          | а, в, с | а, в, с              |
|   | а, в, с              | а, в, с                  | а, в, с          | а, в, с | а, в, с              |
|   | а, в, с              | а, в, с                  | а, в, с          | а, в, с | а, в, с              |
| Тисабеч-Вашарошнамень<br>Вашарошнамень-Токай<br>Тисафюред-Сольнок<br>Сольнок-Сегед    | а, в, с              | а, в, с                  | а, в, с          | а, в, с | а, в, с              |
|   | а, в, с              | а, в, с                  | а, в, с          | а, в, с | а, в, с              |
|   | а, в, с              | а, в, с                  | а, в, с          | а, в, с | а, в, с              |
|   | а, в, с              | а, в, с                  | а, в, с          | а, в, с | а, в, с              |

а - по декадам (в случае необходимости)

в - через 3-4 суток, систематически

с - ежедневно (в случае резких изменений по необходимости)

## Литература

- Horváth S., 1979: A Duna jégviszonyai  
VITUKI Közlemények, No.21, Budapest.
- Lászlóffy W., Szesztay, K., 1964: Vorhersage der Eisverhaeltnisse in Flüssen mit besondere Berücksichtigung der Donau. 2. Konferenz der Arbeitsgemeinschaft der Donau-Laendern für hydrologische Vorhersagen, Wien.
- Lászlóffy W., Szesztay, K., 1965: A folyók jégviszonyainak előrejelzése, Beszámoló a VITUKI munkájáról. OVF kiadványa, Budapest.
- Starosolszky, É., 1969: A jég a vízepítésben VITUKI tanulmányok., 1969.
- WMO (World Meteorological Organisation), 1975: Hydrological Forecasting Practicies. WMO-Operational Hydrology, Report No. 6. Geneva, Switzerland.
- Балашова Ю.В., 1968: Состояние и практическое использование методов краткосрочных прогнозов замерзания рек и водохранилищ. Обзор. Гидрометцентр СССР. Обнинск.
- Комаров В.Д., 1947: Методы краткосрочных прогнозов времени проявления сала и установления ледостава на реках. Труды ЦИП-а, вып. 2/28.
- Шуляковский Л.Г., 1947: К методике краткосрочных прогнозов замерзания и вскрытия рек. Труды ЦИП-а, вып. 5/32.
- Шуляковский Л.Г., 1960: Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах. Расчеты для целей прогнозов. Гидрометиздат, Москва.
- Станчикова А., 1973: Установление зависимости для прогноза ледовых явлений на основании расчета элементов теплового баланса и на основании предполагаемого развития метеорологических элементов. Рабочая группа по научной гидрологии бассейна р. Дунай при Дунайской Комиссии. Сборник работ. I. Ледовый режим, Будапешт.

4.3.1.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии.

См. пункт 4.1.2.5.

4.3.1.6. в Республике Болгарии.

Материалы не получены.

4.3.1.7. в Румынии.

Метод прогнозирования уровней в течение периодов льда.

- Г.Х. Александреску.

Институт метеорологии и гидрологии, Бухарест, Румыния.

Ледовые явления на Дунае (ледоход, ледостав, заторы, появившиеся вместе с повышением уровня) создают затруднения для судоходства, в эксплуатации гидроэнергетических систем "Железные Ворота I и II", а также в проведении экономических деятельностей, использующихся водой реки.

После пуска в эксплуатацию ГЭС "Железные Ворота I и II" режим плавучего льда на Дунае изменился в результате резких колебаний вытекающих расходов воды, но особенно под влиянием плотины, определяющей прерывность процессов очищения воды ото льда и образования ледостава ниже этого участка.

Упомянутые изменения сводятся к следующему:

- отсутствие плавучего льда до местности Калафат и уменьшение появления ледовых явлений на участке Калафат-Джурджу;

- уменьшение частоты появления плавучего льда в течение нормальных зим.

Имея в виду эти изменения, в целях настоящего исследования при анализе и установлении зависимостей прогноза исходили из данных периода 1971-1987 гг., когда вышеуказанные влияния были вызваны гидроэнергетической и навигационной системой "Железные Ворота" и когда течение воды произошло в условиях практически полного обвалования русла Дуная.

Таблица 1 представляет ледовые явления, появившиеся в основных водомерных постах в течение указанного периода.

С тем, чтобы выявить закономерности образования льда на румынском участке Дуная, которое зависит от отрицательных температур воздуха и хотя не явно, но и от отрицательных температур воды, использовались статистические данные более длительного интервала, из которых были выделены следующие аспекты, представляющие интерес с точки зрения совокупности явлений:

- при классификации зимних периодов по критериям температуры воздуха и объема ледовых явлений получается, что 15% зим были суровыми, с большой интенсивностью и продолжительностью явлений зимы (более 2 месяцев), 45% - были средними, когда периоды ледохода и образования ледостава сменялись в течение меньше 1 месяца, и 40% зимних периодов были легкими со слабыми явлениями зимы и без появления льда;

- частота появления ледовых явлений на участке ниже Джурджу составляет 70-80%, т.е. в течение 13 из последних 18 зим появился лёд;

- появление плавучего льда в среднем ожидается в первой декаде января. Самая ранняя дата появления была во второй декаде декабря и самая поздняя - в первой декаде февраля.

Возможное большое отклонение времени в появлении льда объясняется изменчивостью климатических условий на нижнем участке Дуная:



- ледостав образуется только в течение очень суровых зим (приблизительно 1 раз в десятилетие) 10 - 20 дней после появления льда и средним интервалом срока появления льда является вторая и третья декады января;

- заторы вместе с повышением уровня воды появляются особенно тогда, когда ледостав образуется в результате приостановления плавучего льда. В годах, когда зима была особенно суровой, т.к. в 1941-1942 гг., 1962-1963 гг., 1984-1985 гг. и 1986-1987 гг., эти величины были особенно высокими.

Колебания максимального повышения уровня по Дунаю в течение вышеуказанных зимних периодов представлены на рис. 1. Рассматривая этот график, можно констатировать следующее:

- на участке между Груя и Магуреле в течение последних суровых периодов (1984-1985 гг. и 1986-1987 гг.) максимальное повышение оказалось менее значительным, чем до 1970 г., т.е. до пуска в эксплуатацию ГЭС "Железные Ворота";

- даже при настоящих условиях наиболее высокие максимальные уровни наблюдаются на участке Джурджу-Браила. Появляющиеся в районе Олтеница-Кэлэраши максимальные величины 400-500 см - в районе Кэлэраши-Браила уменьшаются до 300-400 см.

Гидрологический прогноз о ледовых явлениях на Дунае состоит из следующих элементов:

- срок и место появления ледообразования и расширения его;

- вид появления ледовых явлений (плавучий лед, ледостав, заторы с повышением уровня);

- уровни и расходы под влиянием ледовых явлений, особенно при образовании заторов с подъемом воды;

- срок и место исчезания льда на Дунае.

Следующие гидрометеорологические сведения составляют основу для разработки прогнозов:

- визуальные наблюдения, сделанные в водомерных постах относительно состояния плавучего льда или ледостава;

- уровни, измеренные и расходы, рассчитанные раз или два раза в день по водомерным постам на Дунае;

- температура воды, измеренная по основным водомерным постам;

- температура воздуха, измеренная по метеорологическим станциям, помещенным, как правило, в тех же портах, как и водомерные посты;

- сведения об имеющихся на притоках ледоходах.

Что касается прогнозов появления и исчезания ледовых явлений на Дунае, таблица 2 представляет условия, необходимые для появления этих явлений, показывая предельные величины (температуры воздуха), продолжительность периода с постоянной отрицательной температурой воздуха, также как и их итоговую сумму.

Относительно срока прогнозов появления и исчезания ледовых явлений следует отметить, что последние составляются при помощи метеорологических прогнозов и могут быть краткосрочными или, по крайней мере, среднесрочными (сроком не более 1 недели).

Прогнозы появления и исчезания льда, в свою очередь, являются очень полезными при составлении прогнозов уровней относительно периодов, когда появление плавучих льдин, как правило, сопровождается значительным повышением уровня воды.

На основе рисунков 1, 2 и 3 можно констатировать, что колебания повышения уровней с небольшой разницей следят по времени колебания постоянной отрицательной температуры воздуха.

Резкий подъем начинается 10-15 дней после поступления явлений зимы. В зависимости от суровости зимы уровни воды колеблются в пределах следующих величин: на участке Турну-Магуреле-Кэлэраши от 100-150 см до 300-500 см и ниже этого участка - от 0-50 см до 200-300 см.

Наблюдения, касающиеся разницы по времени между колебаниями повышения уровней и колебаниями отрицательной температуры, составляли основу ниже предложенного метода прогнозирования.

Графики 4-6 и 7-9 представляют колебания по времени поправочных коэффициентов  $K_i$  и скошенную кривую температуры воздуха относительно зимы 1984-1985 гг. и 1986 - 1987 гг. по водомерным постам Джурджу-Кэлэраши и Браила. Поправочный коэффициент показывает соотношение между фактическим расходом и расходом, определенным кривой, составленной на основе зарегистрированных уровней. Собственное каждой станции разница по времени  $\Delta t$  (указанная на графиках рисунков 4-6) делает возможным определение зависимости прогноза

$$K_i = f(T_{\text{воздух}})$$

где:  $T_{\text{воздух}}$  - представляет температуру воздуха, полученную на кривой с помощью  $\Delta t$  с движом вперед по времени.

После этого были составлены графики, показывающие связь между величинами  $K_i$  и повышением уровня  $\Delta H$  по тем же станциям (рисунки 7-9).

Графики были составлены для водомерных постов Джурджу, Кэлэраши и Браила, расположенных на участках, где в районах с низким уровнем воды особенно сильно обнаруживается повышение уровня впоследствии ледостава и появления плавучих льдин.

Этапы работы и способ составления прогноза:

- a) приобретение сведений относительно положения ледовых явлений (если такие имеются);
- b) приобретение данных относительно температуры воды, наблюдая при этом, как они приближаются к предельным условиям, указанным в таблице 1 ( $T_{\text{вода}} \searrow 0,2 \text{ C}^{\circ}$ );
- c) приобретение данных о температуре воздуха и о прежнем развитии ее по продолжительности  $\Delta t$  (дней), т.е. разницы по времени между появлением отрицательной температуры воздуха и повышением уровня;
- d) определение кривой  $T^{\circ}_{\text{воздух}}$  для рассматриваемого в прогнозе интервала ( $T_{\text{прог.}}$ ) путем экстраполяции на основе метеорологического прогноза.

В случае долгосрочного прогноза:

$$T_{\text{прог.}} - T_{\text{общее (30 дней)}} - \Delta t \quad (\text{разница по времени})$$

В случае краткосрочного и среднесрочного прогнозов:

$$T_{\text{прог.}} < \Delta t$$

- e) проверка условия  $T_{\text{вода}}(\text{прог.}) < T_{\text{предельное}}$  (условие ледообразования в прогнозируемом интервале);

- f) определение на графике корреляции  $K_i = f(T_{\text{воздух}})$  коэффициента  $K_i$ , соответствующего прогнозируемому сроку  $T_{\text{прог}}$ .

С применением соотношения  $\Delta H = f(K_i)$  можно определить повышение уровня воды в течение прогнозируемого времени.

Реализуется также восстановление этих прогнозируемых величин  $\Delta H$ , исходя из величин, полученных в моменте прогноза, путем поправки графика  $K_i = f(T_{\text{воздух}})$  или с применением параллельной к средней величине кривой, пересекающей некоторые уже установленные величины.

$$K_i - T_{\text{воздух}}$$

- g) Нарисуй кривую  $K_i$  для дней, когда были обнаружены ледовые явления, после экстраполяции соотношением  $K_i = f(T_{\text{воздух}})$  определяется момент поступления минимальной величины  $K_i$ , т.е. срок максимального повышения уровня;
- h) величина  $\Delta H_{\text{макс}}$  (максимальное повышение) определяется с помощью корреляции  $\Delta H = f(K_i)$ .

Графики колебания  $\Delta H$  зимой 1984-1985 гг. и 1986-1987 гг. (рис. 2 и 3) и фигурирующие на рис. 10 и 11 графики комплексных данных используются при определении повышения воды путем интерполяции для других водомерных постов, а также для других зимних периодов с аналогичными климатическими условиями.

Таблица 1

ЛЕДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ПОЯВИВШИЕСЯ В ОСНОВНЫХ ВОДОМЕРНЫХ ПОСТАХ  
В ПЕРИОД 1971-1987 гг.

| Явления<br>в в.п. | 1971 | 1972      | 1973      | 1974 | 1975 | 1976      | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985      | 1986 | 1987      |
|-------------------|------|-----------|-----------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|------|-----------|
| Корабия           | S    | S         | S         | ×    | ×    | S         | S    | ×    | S    | S    | S    | S    | ×    | ×    | S,P<br>ΔH | ×    | S         |
| Джурджу           | S    | S         | S         | ×    | ×    | S         | S    | ×    | S    | S    | S    | S    | ×    | ×    | S,P<br>ΔH | ×    | S,ΔH      |
| Кэлэраши          | -    | -         | S,ΔH      | ×    | ×    | S         | S,ΔH | ×    | S    | S    | S    | S    | ×    | ×    | S,P<br>ΔH | ×    | S,P<br>ΔH |
| Чернавода         | S    | S,P       | S         | S    | ×    | S,P<br>ΔH | S    | ×    | S    | S    | S    | S    | ×    | ×    | S,P<br>ΔH | S    | S,P<br>ΔH |
| Браила            | S    | S         | S,P       | S    | ×    | S,ΔH      | S    | ×    | S    | S    | S    | S    | ×    | ×    | S,P<br>ΔH | S    | S,P<br>ΔH |
| Исакча            | -    | -         | -         | -    | -    | S,P<br>ΔH | S    | S    | S    | S    | ×    | S    | ×    | ×    | S,P<br>ΔH | S    | S,P<br>ΔH |
| Тулча             | ×    | S,P<br>ΔH | S,P<br>ΔH | S    | ×    | S,P<br>ΔH | S    | S    | S    | S    | S    | S    | ×    | ×    | S,P<br>ΔH | S    | S,P<br>ΔH |

S - льдина

P - ледостав

ΔH - повышение уровня

ОРИЕНТИРОВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ПРОГНОЗОВ ОБ УСЛОВИЯХ  
ОБРАЗОВАНИЯ И ИСЧЕЗАНИЯ ЛЬДИН НА ДУНАЕ НА  
УЧАСТКЕ ДЖУРДЖУ-БРАИЛА

ОБРАЗОВАНИЕ И РАСШИРЕНИЕ ЛЬДИН

А. Краткосрочный и среднесрочный прогноз (1;3 и 7 дней)

I. ЛЬДИНЫ:

а)  $t^{\circ}$  воды  $< 1^{\circ}$  и  $\sum -t^{\circ}$  воздуха  $\sim -50^{\circ}$ ; ( $t^{\circ}$  воздуха  $< -7^{\circ}$ )

б)  $t^{\circ}$  воды  $< 0,5^{\circ}$  и  $t^{\circ}$  воздуха  $\sim -30^{\circ}$ ; ( $t^{\circ}$  воздуха  $< -5^{\circ}$ )

Q воды  $< 5000 \text{ м}^3/\text{с}$ .

с) льдины, приходящие из притоков.

II. ЛЕДОСТАВ:

а)  $t^{\circ}$  воды  $\sim 0,2^{\circ}$

б)  $\sum t^{\circ}$  воздуха  $\sim -150^{\circ}$ ; ( $t^{\circ}$  воздуха  $\leq -10^{\circ}$ )

с)  $K_i < 0,75$

д) Q воды  $< 4000 \text{ м}^3/\text{с}$ .

III. ПОВЫШЕНИЯ ( $\Delta H$ ):

а)  $K_i < 0,65$

б)  $\sum t^{\circ}$  воздуха  $< -150^{\circ}$  ( $t^{\circ}$  воздуха  $< -10^{\circ}$ )

с) Q воды  $< 5000 \text{ м}^3/\text{с}$ .

д) Установление ледостава или остановление льдин на участке.

В. Долгосрочный прогноз

прогнозируемая  $t^{\circ}$  воды  $< 2^{\circ}$

прогнозируемая  $t^{\circ}$  воздуха  $< 0^{\circ}$

льдины:  $0^{\circ} - 10^{\circ}$

ледостав:  
 $-5^{\circ} - 15^{\circ}$

повышения:  
 $-10^{\circ} - 20^{\circ}$

## ИСЧЕЗАНИЕ ЛЕДООБРАЗОВАНИЙ

Льдины:  $t^{\circ}$  воды = ↗  
 $t^{\circ}$  воздуха ↗  $0^{\circ}$ ;  $\Delta t^{\circ} \geq 10^{\circ} \rightarrow 15^{\circ}$  (в течение 3-5 дней)

Ледостав:  $t^{\circ}$  воды ↗ (если измеряется)  
 $t^{\circ}$  воздуха ↗  $0^{\circ}$ ;  $\Delta t^{\circ} \geq \begin{cases} 15^{\circ} \rightarrow 20^{\circ} \\ (в течение 3-5 дней) \\ 10^{\circ} \rightarrow 15^{\circ} \\ (в течение 5-7 дней) \end{cases}$



Рис. 1. Максимальные повышения уровней по Дунаю в течение характерных зимних периодов

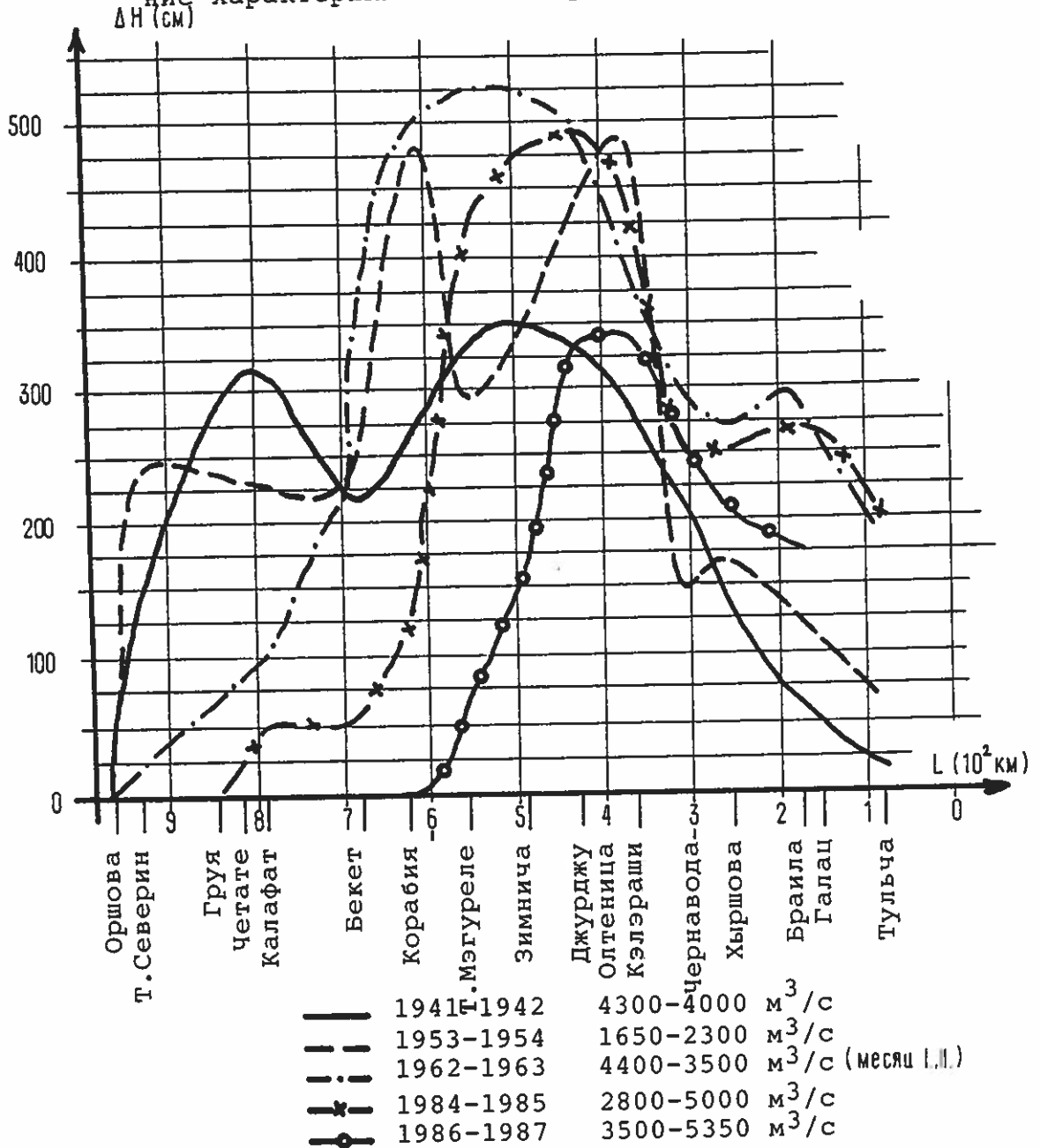


Рис. 2. Повышения уровней зимой 1985 г.

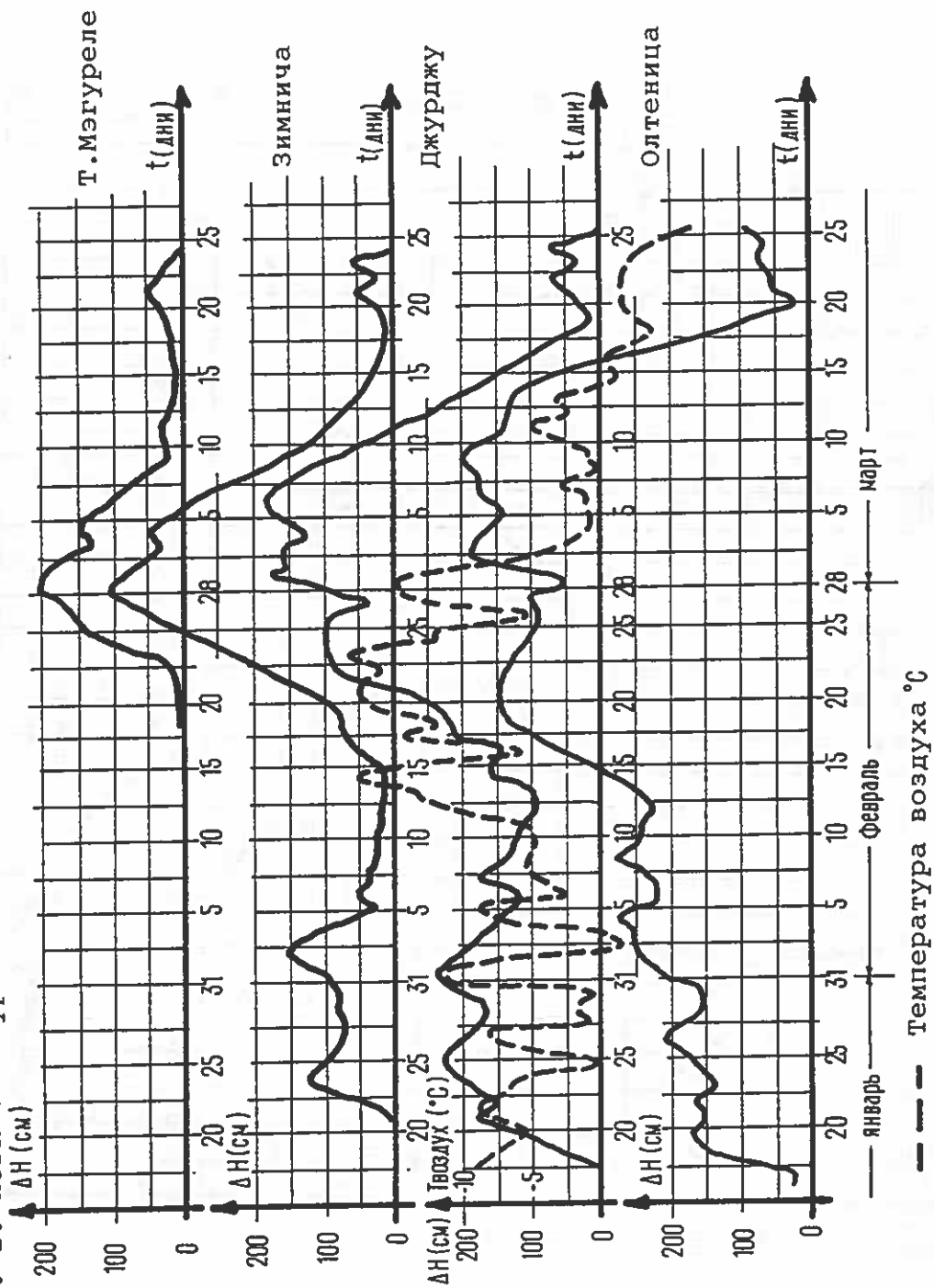


Рис. 2. Продолжение

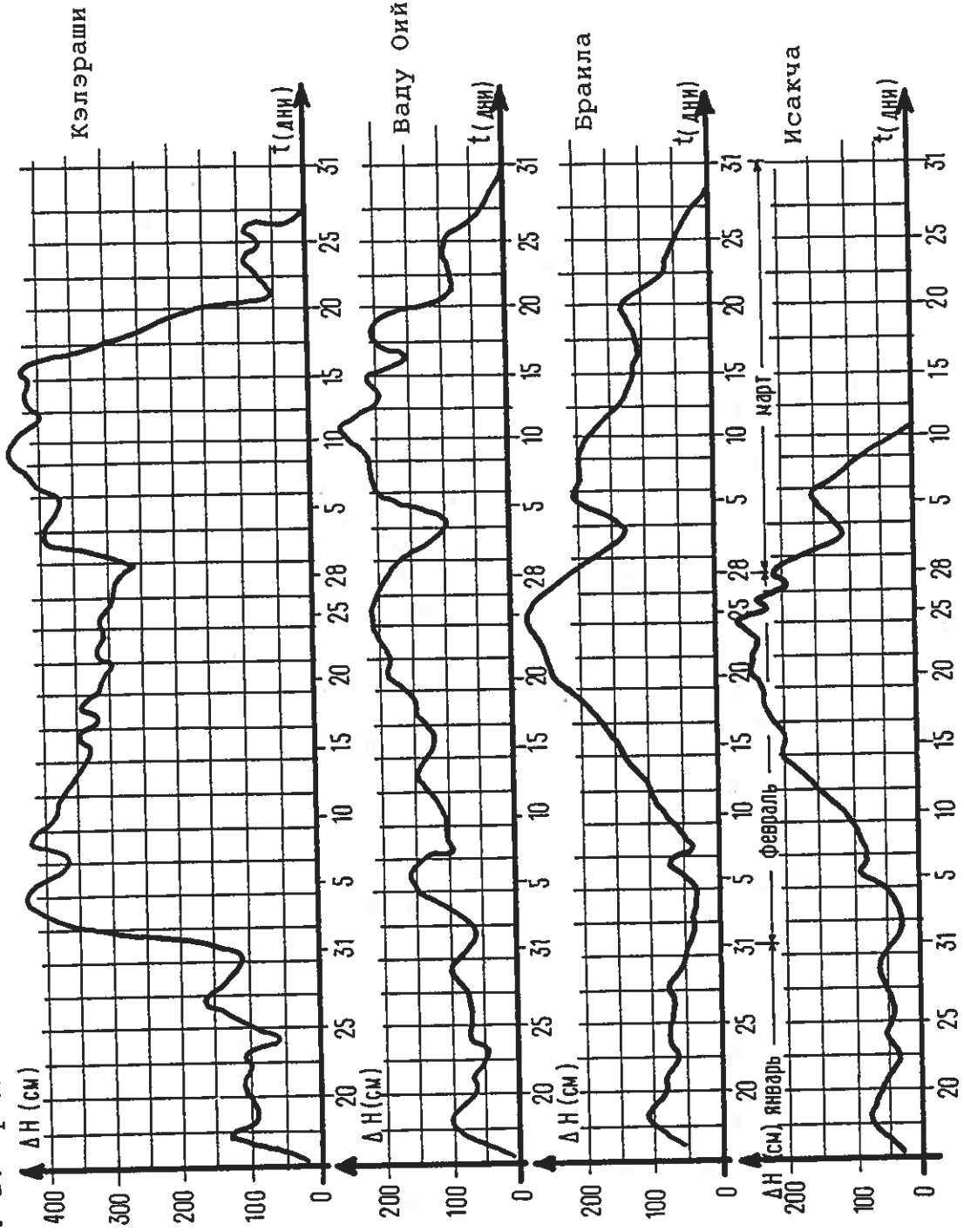


Рис. 3. Повышения уровней зимой 1987 г.

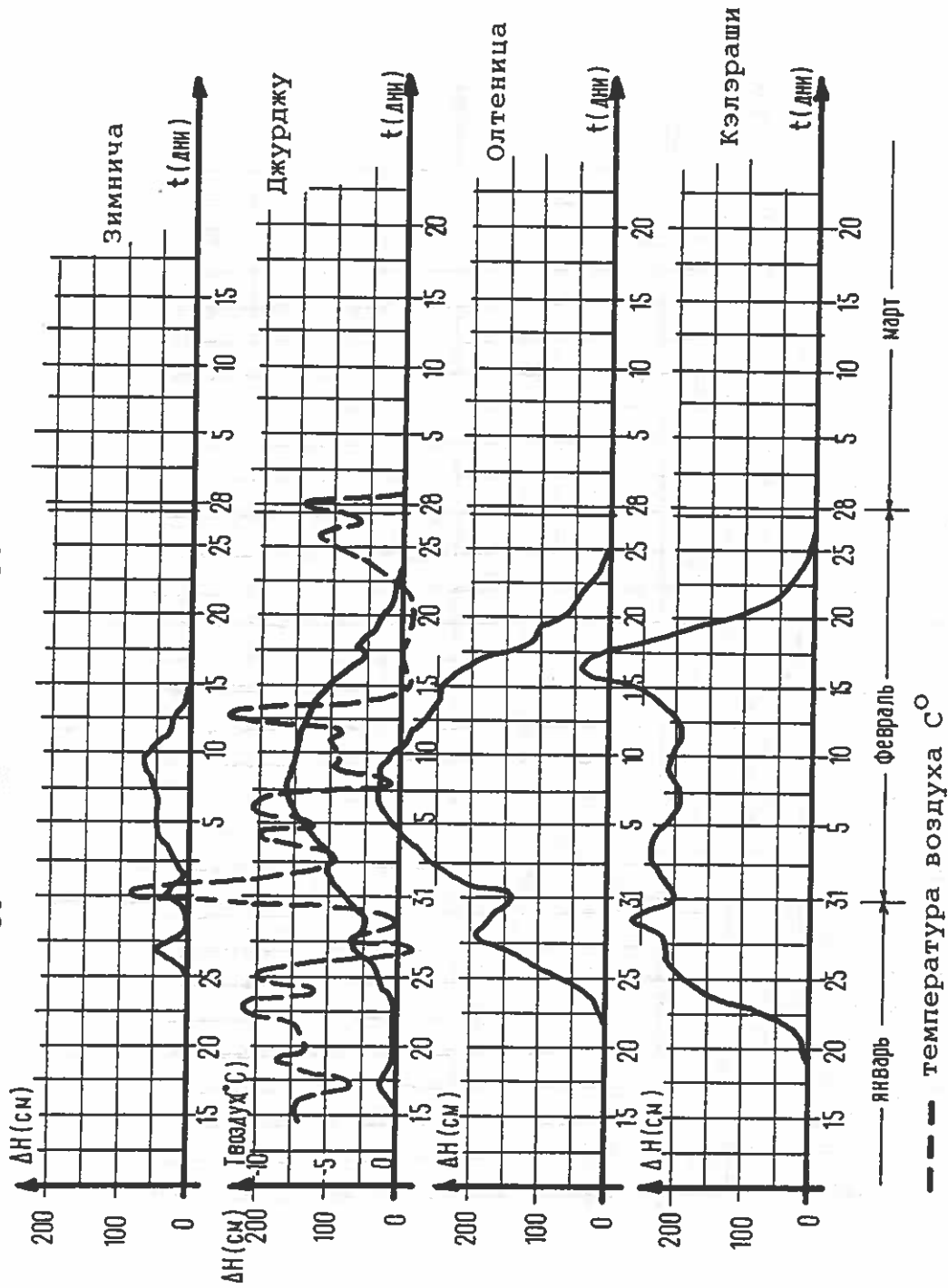


Рис. 3. Продолжение

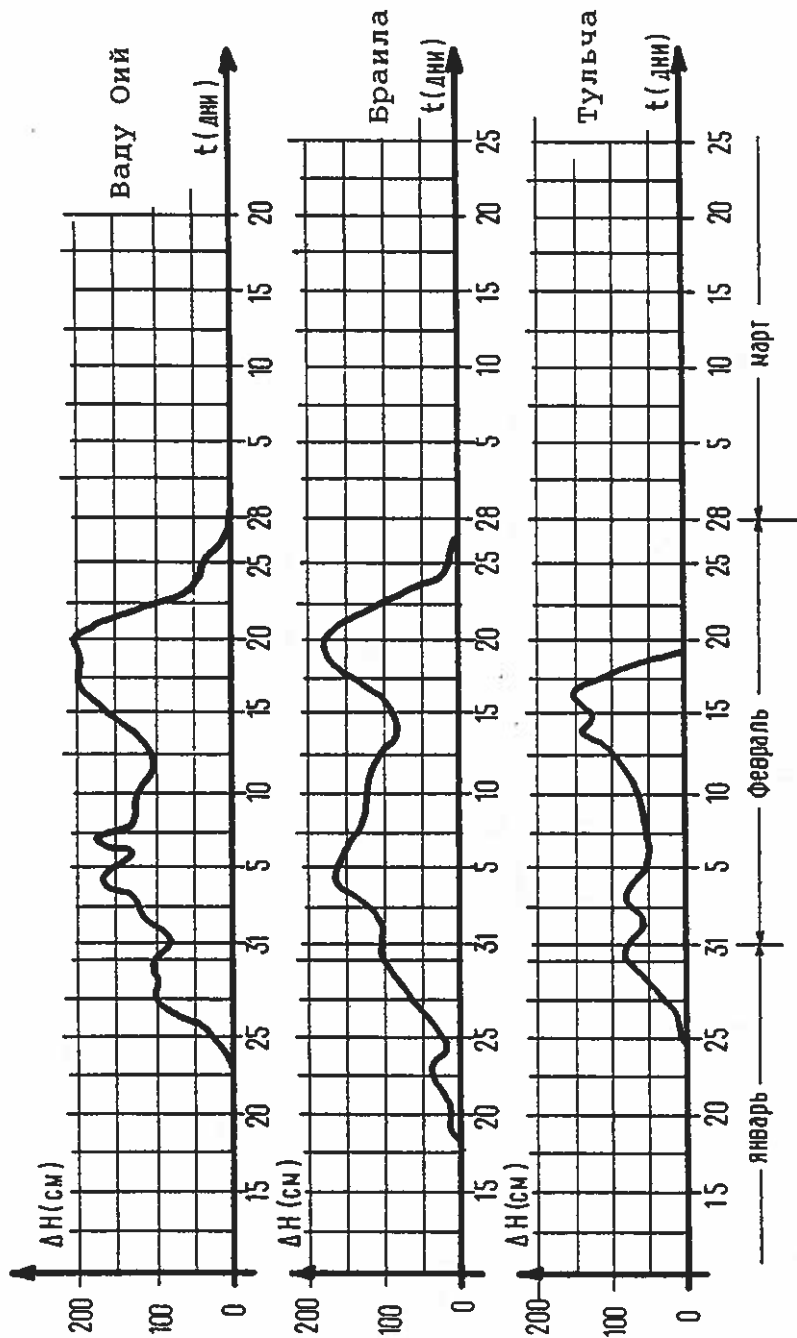


Рис.4. Колебания поправочного коэффициента  $K_i$  и температуры воздуха зимой 1985 и 1987 гг.

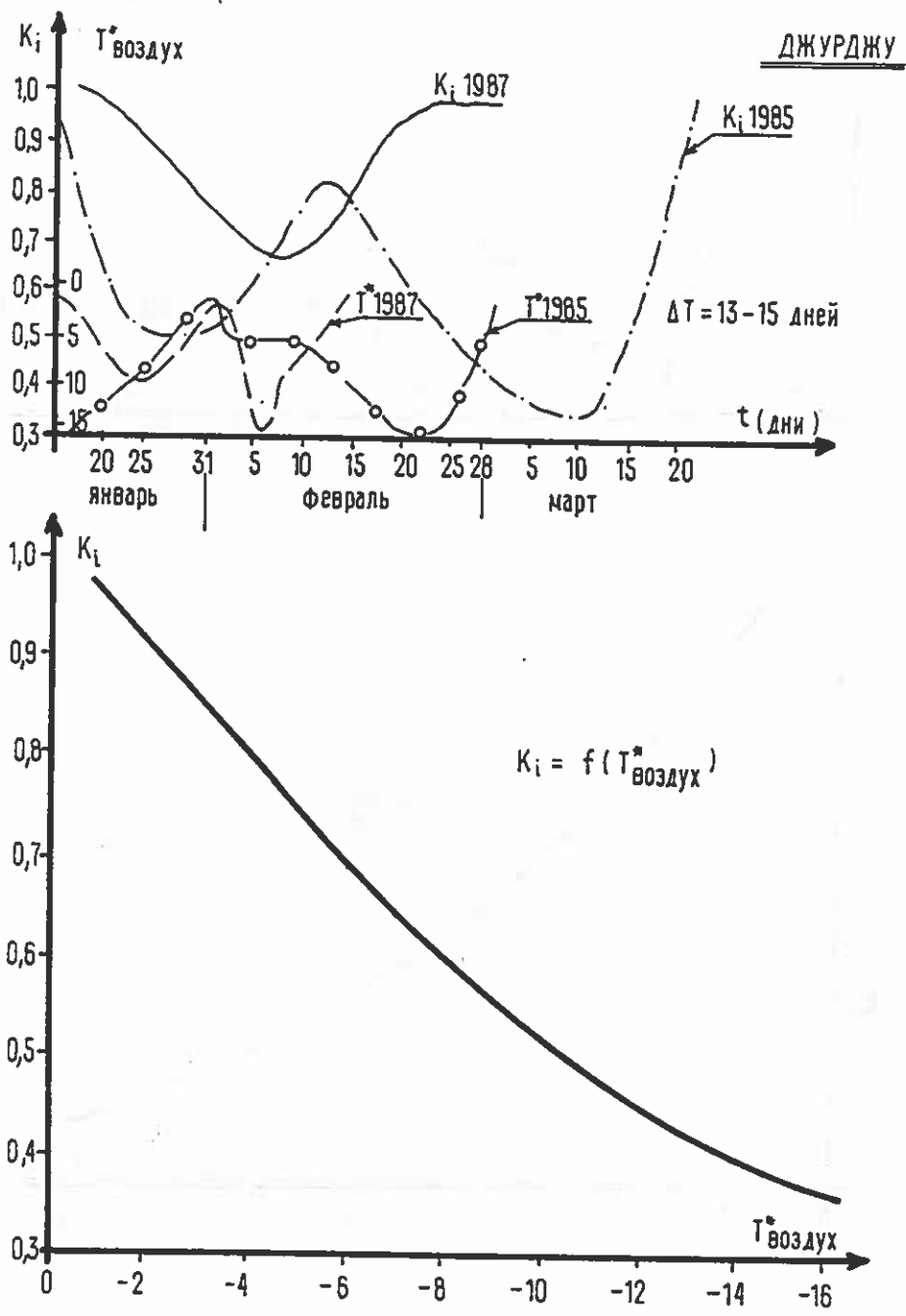


Рис.5. Колебания поправочных коэффициентов  $K_i$  и температуры воздуха  $T^*$  зимой 1985 и 1987 гг.

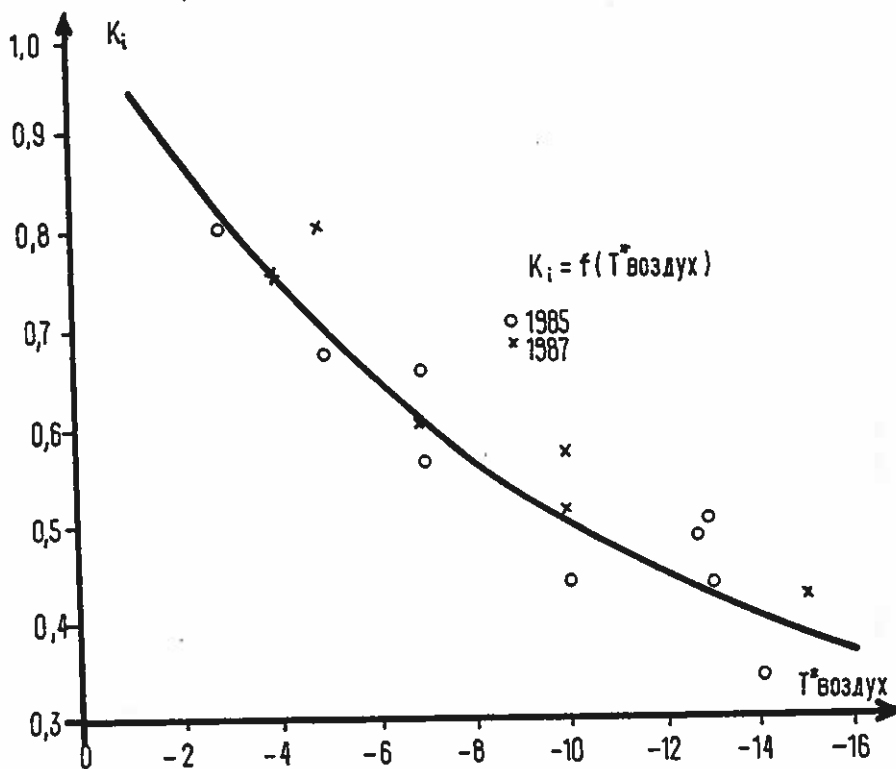
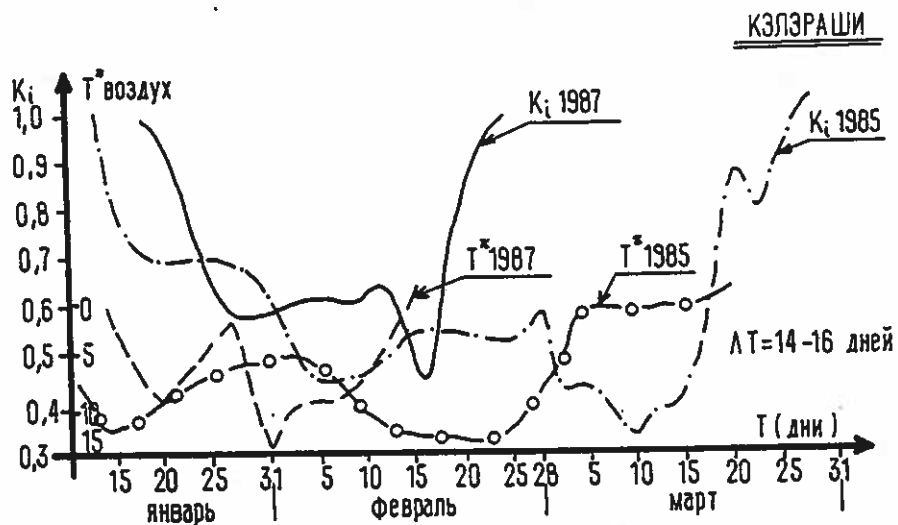


Рис. 6. Колебания поправочных коэффициентов  $K_i$  и температуры воздуха зимой 1985 и 1987 гг.

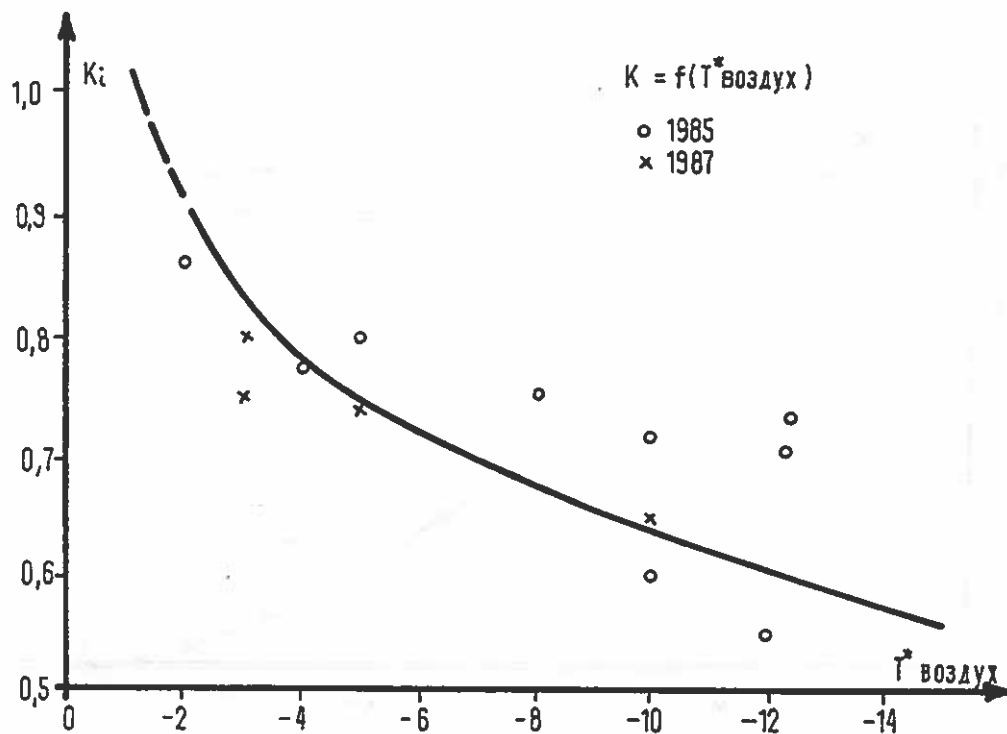
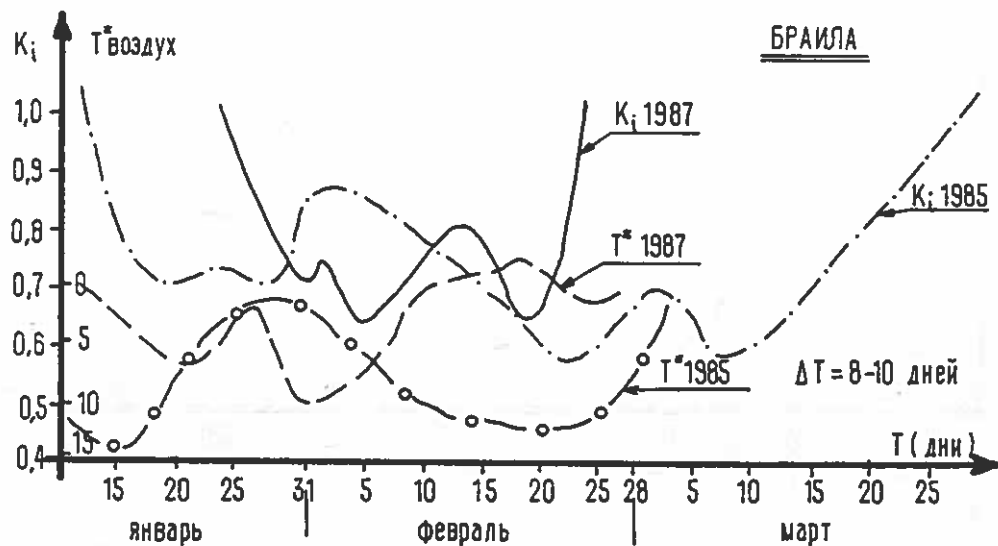




Рис. 7. Колебания повышений  $\Delta H$  зимой 1985 и 1987 гг.

ДЖУРДЖУ

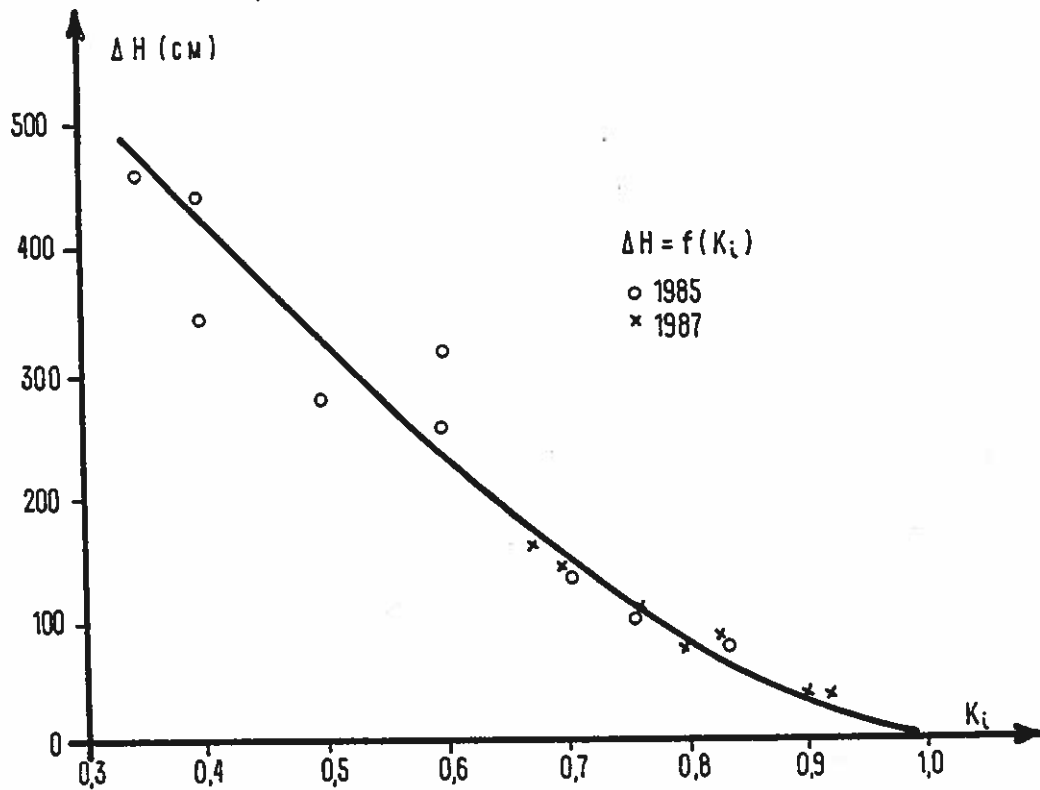
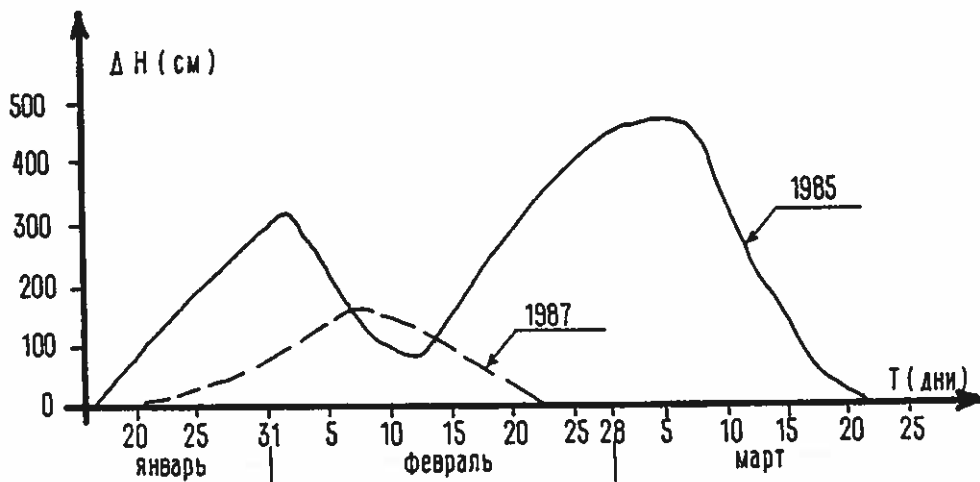


Рис.8. Колебания повышения  $\Delta H$  зимой 1985 и 1987 гг.

КЭЛЭРАШИ

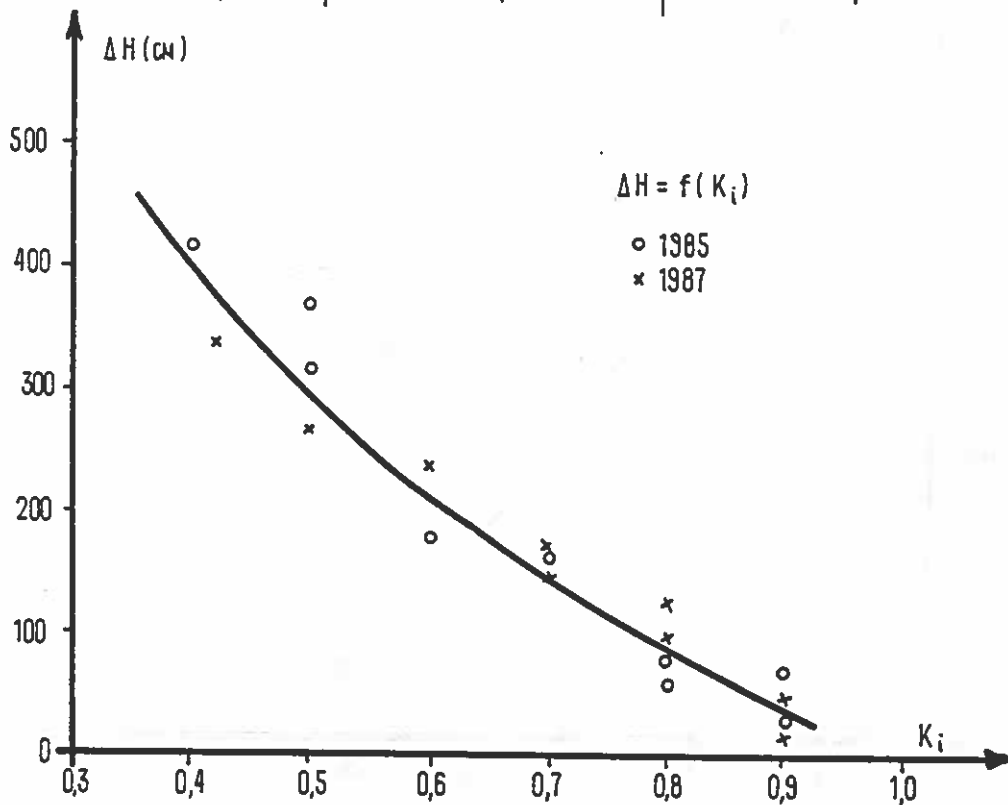
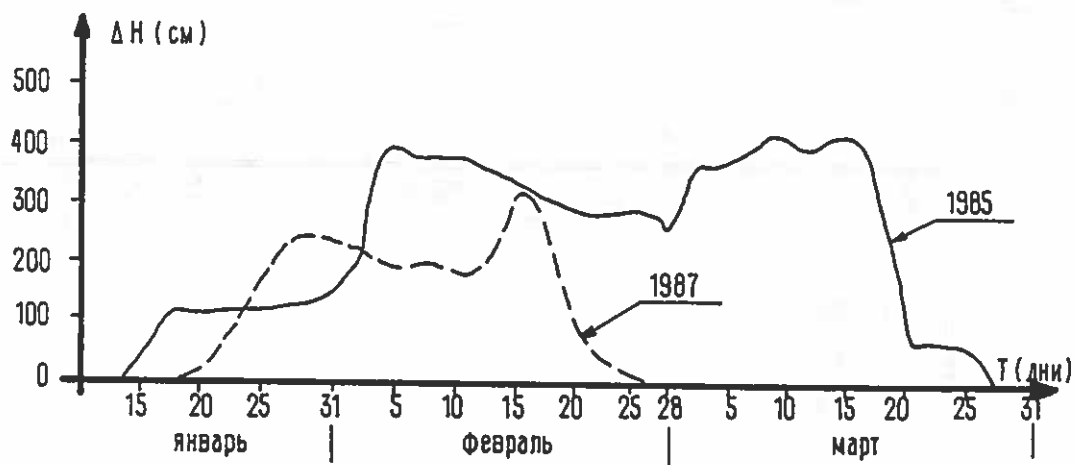


Рис. 9. Колебания повышений  $\Delta H$  зимой 1985 и 1987 гг.

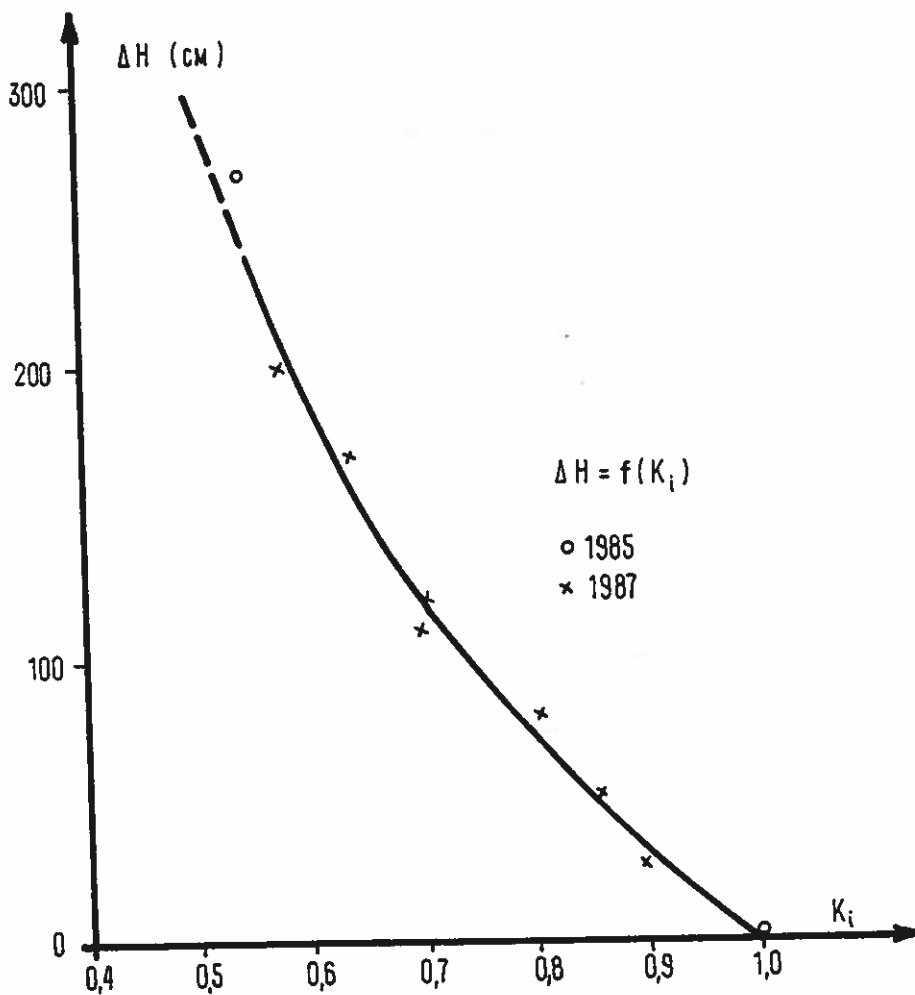
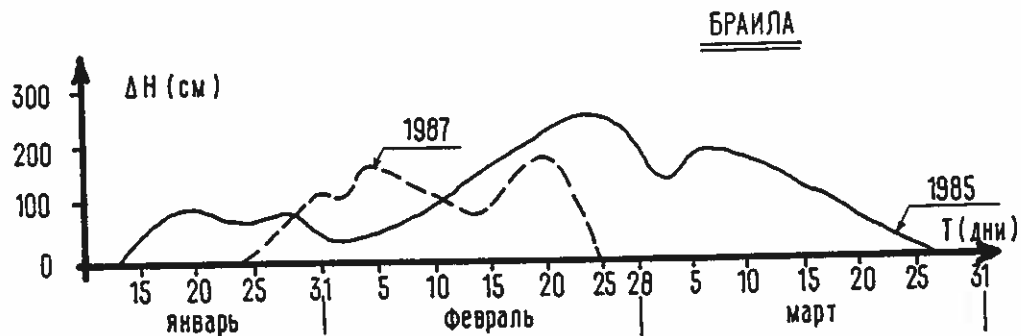


Рис. 10. Чернавода 1985 год

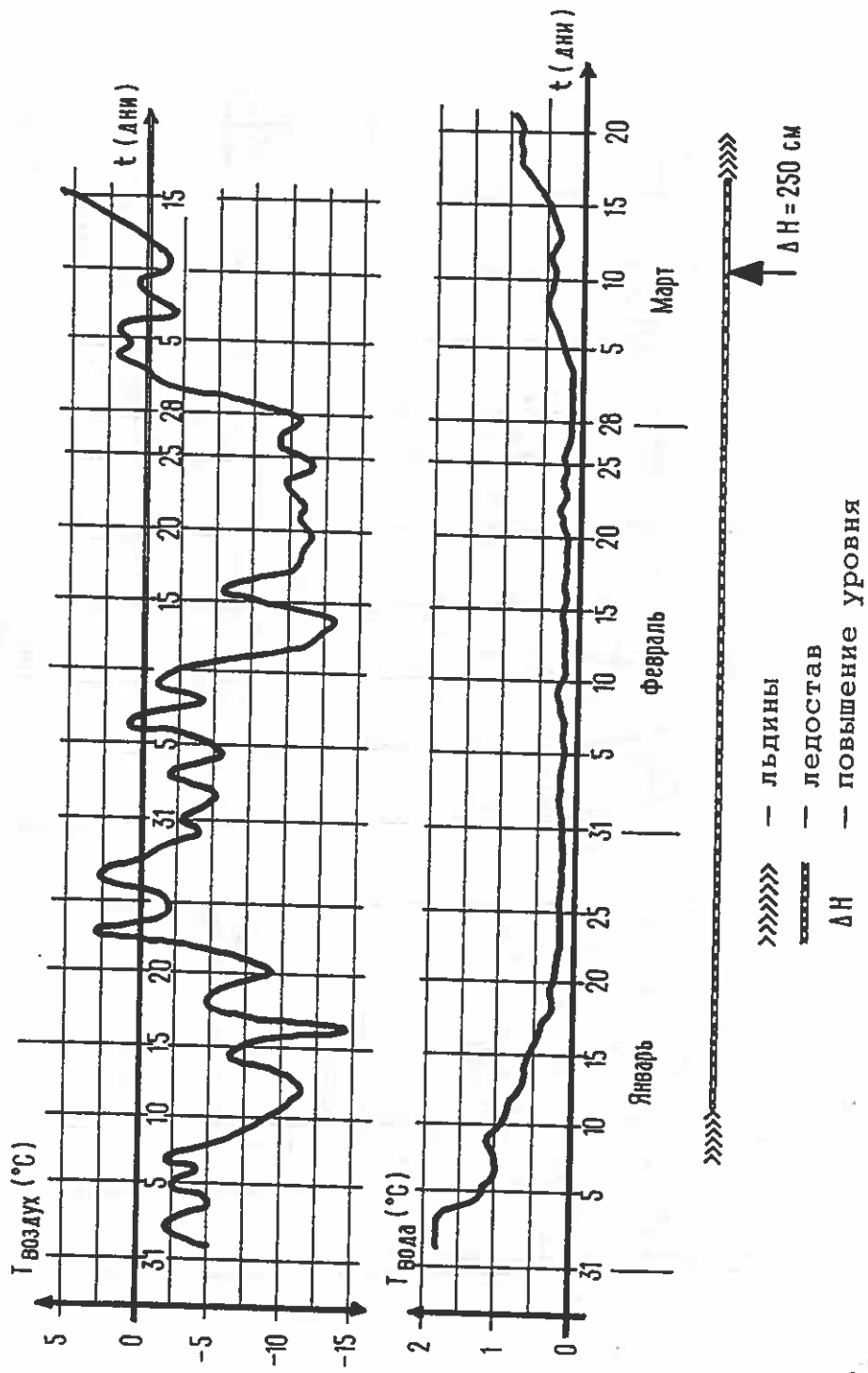
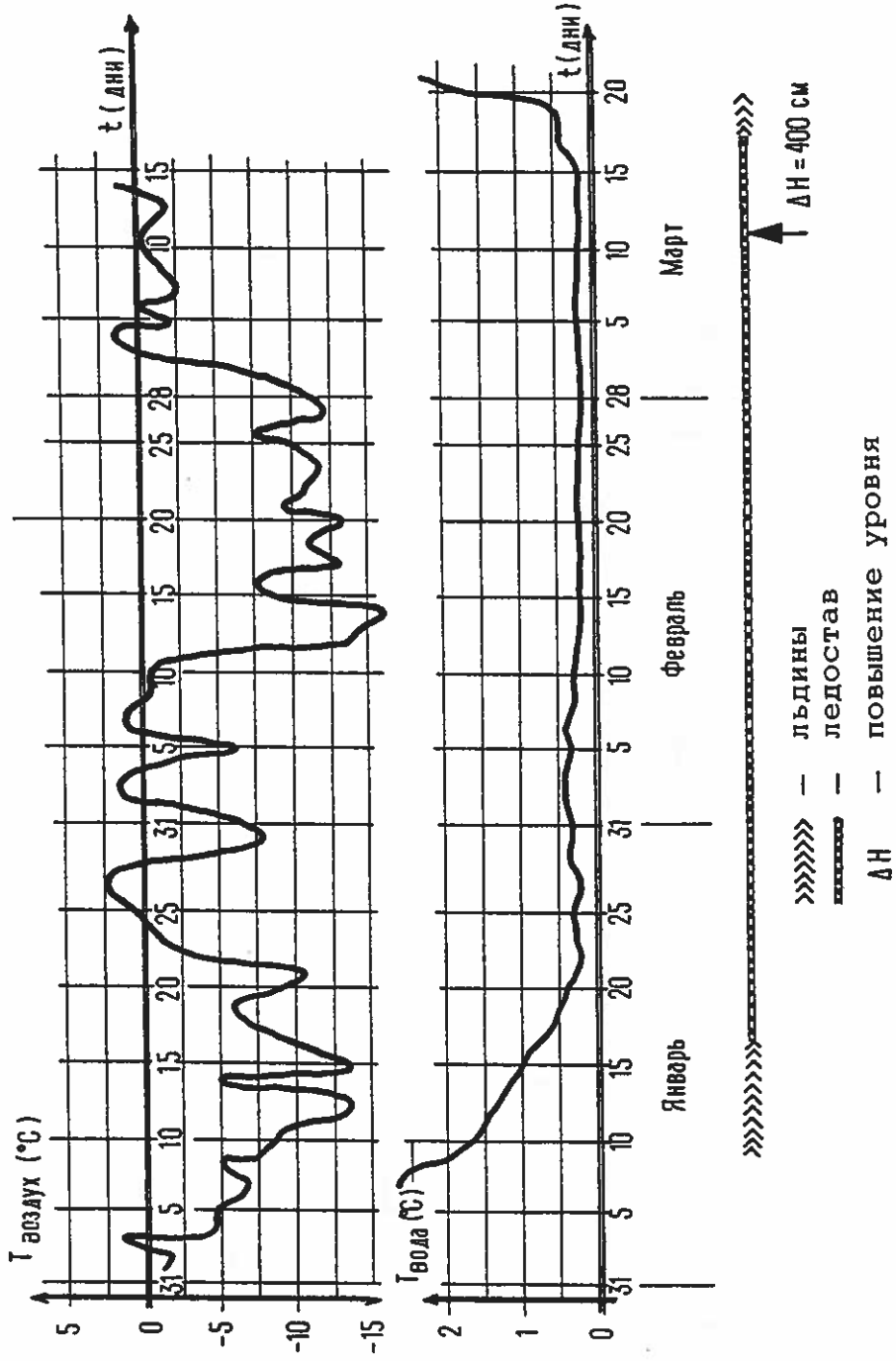


Рис.11. Фетешти 1985 год



4.3.1.8. в Союзе Советских Социалистических Республик.

"Метод долгосрочного прогноза сроков появления льда на р. Дунай" - Метод разработан в Государственном гидрологическом институте в 1980 г. м.н.с. Шаночкиным С.В.

Своеобразие ледового режима р. Дунай, в частности, большая изменчивость дат появления льда даже на близко расположенных постах, вызывает необходимость при статистическом анализе и прогнозе оперировать с данными для характерных участков реки. Фоновые сроки ледообразования на четырех находящихся в естественном состоянии участках Среднего и Нижнего Дуная даны в таблице 1.

Таблица 1

Средние многолетние характеристика ледового режима р. Дунай

| Участок                       | Самая ранняя дата появления льда | Средняя многолетняя дата появления льда | Самая поздняя дата появления льда | Средняя продолжительность ледовых явлений (в сутках) | Наибольшая продолжительность ледовых явлений (в сутках) |
|-------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------------------|--|---|
| г. Братислава-г. Будапешт (I) | 21.XI                            | 1.1.                                    | 10.П                              | 22   | 86  |
| г. Будапешт-г. Нови-Сад (II)  | 24.XI                            | 3.1                                     | 10.П                              | 31   | 86  |
| г. Корабия-г. Олтеница (III)  | 7.XII                            | 4.1                                     | 22.П                              | 23   | 86  |
| ниже г. Олтеницы              | 8.XII                            | 4.1                                     | 23.П                              | 33   | 91  |

В связи с тем, что окончательные прогностические указания даются в виде уравнений множественной линейной регрессии, требуется численное задание информации всех лет наблюдений, включая годы, когда лед на участках не образовывался. Формализация и численное представление подобной ситуации осуществляется из следующих соображений. Анализ многолетних рядов наблюдений показал, что самые поздние даты появления льда на реке (участке) приходятся на 22-23 февраля. Учитывая, что норма сроков ледообразования 1-4 января, во временном ряду аномалий сроков появления льда годы с его отсутствием кодировались "+50". Эта цифра является до некоторой степени условной, но использование ее в выборках для разработки прогностических уравнений, в конечном итоге, позволило получить вполне удовлетворительный результат.

Решающую роль на сроки ледообразования на Дунае играют погодные условия и в первую очередь - режим температуры воздуха в период охлаждения водной массы. Его формирование - следствие преобразования атмосферных процессов на больших пространствах и в течение длительного времени.

Метод долгосрочного прогноза основан на анализе и многократной компрессии информации о 10-ти месячной предистории развития атмосферных процессов на территории всего северного полушария.

В качестве информации, характеризующей общую циркуляцию атмосферы на северном полушарии, использовались совокупности полей месячных аномалий приземного давления и температуры воздуха (за 03 ч) с января по октябрь за 1938-1977 гг. Поля описывались значениями метеоэлементов в конкретных пунктах (70 по  $\Delta p$  и 40 по  $\Delta t$ ).

Проблема выделения из этого обширного архива исходных данных, наиболее прогностически информативных, решалась с использованием двух типов их компрессии (сжатия) - структурного и релятивного. Естественно не все

районы северного полушария в каждом месяце в одинаковой степени прогностически информативны, поэтому, прежде всего, осуществлялось выделение динамически значимых областей. Определялись они по специально построенным для этой цели картам изокоррелят. В последующих вычислительных процедурах информация этих областей описывалась данными тех станций, которые имеют наибольшие коэффициенты корреляции со сроками ледообразования на Дунае. В таблице 2 приведены названия станций, информация которых (после соответствующего анализа) непосредственно используется для получения прогностических зависимостей.

Второй этап компрессии заключался в представлении информации показательных областей полушария в виде количественных характеристик атмосферных процессов. Было разработано два варианта (схемы) физико-статистического прогноза, в которых исходная система тест-предикторов получена соответственно структурным и релятивным способами компрессии.

В первом варианте (схеме) был применен компонентный анализ (метод разложения на естественные ортогональные составляющие).

Исходную метеорологическую информацию можно представить в виде матрицы:

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nm} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

По матрице (1) вычисляется ковариационная матрица R

$$R = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1m} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{m1} & \gamma_{m2} & \dots & \gamma_{mm} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f_{ki} - \bar{f}_i)(f_{kj} - \bar{f}_j), \quad (3)$$



Станции, данные которых используются при прогнозе по уравнению (2)

| №№<br>п/п | Д а в л е н и е   |                         |   |  |
|-----------|-------------------|-------------------------|---|--|
|           | март              | апрель                  | июнь  | октябрь  |
| 1.        | Барроу            | Ангмагсалик             | Кол-Харбор                                    | Фэрбенкс                                       |
| 2.        | Аклавик           | Рейкьявик               | Коппермайн                                    | Кадьяк   |
| 3.        | Коппермайн        | Лиссабон                | Мусони  | Кол-Харбор                                     |
| 4.        | Те-Пас            | Вена                    | Чикаго  | Те-Пас   |
| 5.        | о.Нантакет        | Мал.Кармаку-<br>лы      | о.Нантакет                                    | Денвер   |
| 6.        | Брест<br>(франц.) | Архангельск             | Ангмагсалик                                   | Арктик-Бей                                     |
| 7.        | Лиссабон          | м.Желания               | м.Тобин                                       | о.Резальюшен                                   |
| 8.        | Вена              | Салехард                | Рейкьявик                                     | Мурманск                                       |
| 9.        | Рим               | Хатанга                 | 50 <sup>0</sup> с.ш.,<br>20 <sup>0</sup> з.д. | Салехард                                       |
| 10.       | Афины             | Тура                    | Брест<br>(франц.)                             | Казалинск                                      |
| 11.       | Архангельск       | Иркутск                 | Киев  | Омск   |
| 12.       | Казань            | б.Тикси                 | Волгоград                                     | Кызыл  |
| 13.       | Оренбург          | Якутск                  | Омск  | Александровск-<br>Сахалинский                  |
| 14.       | Казалинск         | о.Котельный             | Якутск  | 40 <sup>0</sup> с.ш.,<br>140 <sup>0</sup> в.д. |
| 15.       | Омск              | о.Четырёх-<br>Столбовой | Алексан-<br>дровск-Саха-<br>линский           | Датч-Харбор                                    |

Далее решением полной проблемы матрицы R находятся собственные векторы U

$$(R - \lambda E)U = 0, \quad (4)$$

где: E - единичная матрица,

U - собственные векторы,

$\lambda$  - собственные значения матрицы R.

Система собственных векторов получается ортогональной и нормированной, поэтому значения коэффициентов разложения вычисляются по формуле:

$$K_{hi} = \sum_{k=1}^m U_{hk} \cdot f_{ik} \quad (5)$$

В прогностической схеме коэффициенты  $K_{hi}$  рассматриваются в качестве тест-предикторов.

Точность представления полей (скорость сходимости разложения) по некоторому числу естественных составляющих (h) оценивается показателем

$$d = \frac{\sum_{h=1}^h \lambda_h}{\sum_{h=1}^m \lambda_h} \cdot 100\% \quad (6)$$

Во втором варианте (схеме) был использован дискриминантный анализ. Алгоритм решения задачи заключается в следующем.

Формируется совокупность метеоданных

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} f_{12} \dots f_{1m} \\ f_{21} f_{22} \dots f_{2m} \\ \dots \\ f_{n1} f_{n2} \dots f_{nm} \end{pmatrix}$$

Известно (согласно обучающему правилу градуировки предиктанта), что часть векторов принадлежит классу А, часть - к классу В, а принадлежность некоторой части векторов, принадлежащих к классу А, равно  $n_A$ , к классу В -  $n_B$ .

Таким образом,  $n_A + n_B \leq n$ .

По совокупности всех классифицированных векторов вычисляется корреляционная матрица R

$$R = \begin{pmatrix} \gamma_{11} \gamma_{12} \dots \gamma_{1m} \\ \gamma_{21} \gamma_{22} \dots \gamma_{2m} \\ \dots \\ \gamma_{m1} \gamma_{m2} \dots \gamma_{mm} \end{pmatrix}$$

где  $\gamma_{ij} = \frac{1}{n_A + n_B} \sum_{k=1}^{n_A+n_B} (f_{ki} - \bar{f}_i) (f_{kj} - \bar{f}_j)$

По совокупности векторов, принадлежащих к классам А и В, строится ковариантная матрица между классами  $R^*$

$$R^* = \begin{pmatrix} * & * & \dots & * \\ \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1m} \\ * & * & \dots & * \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ * & * & \dots & * \\ \gamma_{m1} & \gamma_{m2} & \dots & \gamma_{mm} \end{pmatrix} \quad (7)$$

здесь:

$$r_{ij}^* = f_i(A) f_j(A) + f_i(B) f_j(B) - f_i(A) f_j(B) - f_j(A) f_i(B) , \quad (8)$$

где:  $f_i(A)$  -тая компонента вектора, принадлежащего классу А,  
 $f_j(B)$  -тая компонента вектора, принадлежащего классу В.

После вычисления матриц R и R\* решается уравнение

$$(R^* - \lambda R)U=0, \quad (9)$$

то есть находятся собственные значения и главные векторы  $u$ . Они расставляются в порядке убывания (по модулю) собственных чисел. В качестве предсказателей используется коэффициент  $Z_{1k}$  вычисляемый по значениям лишь первой компоненты

$$Z_{1k} = \sum_{i=1}^m U_{1i} f_{ki} , \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

В первой схеме система тест-предикторов состояла из ста членов (по 5 коэффициентов разложения для каждого месяца и метеозлемента), во второй - из двадцати.

Оптимизация состава предикторов прогностических уравнений выполнялась с использованием, так называемых, коэффициентов прогностической информативности (КПИ). Если величина обычного коэффициента множественной корреляции с увеличением числа переменных растет (не убывает), то КПИ растет лишь до определенного момента, а затем при добавлении очередного предсказателя - убывает. Максимальное значение КПИ указывает на оптимальный состав предикторов и с определенной степенью достоверности служит оценкой эффективности использования уравнения в условиях, приближенных к практике выпуска оперативных прогнозов.

Оценка прогностических зависимостей производилась согласно действующему Наставлению.

В результате отбора оптимальной совокупности предикторов для долгосрочного прогноза сроков появления льда на Дунае (схема 1) было построено уравнение

$$\Delta D = A_0 + A_1 K_{1p}^{III} + A_2 K_{2p}^{IV} + A_3 K_{3p}^{IV} + A_4 K_{1p}^{VI} + A_5 K_{1p}^X, \quad (11)$$

где  $\Delta D$  - ожидаемые отклонения сроков появления льда от нормы в сутках;

$A_0$  - свободный член уравнения;

$A_1 - A_5$  - коэффициенты уравнения регрессии;

$K_{1p}^{III}, K_{2p}^{IV}, K_{3p}^{IV}, K_{1p}^{VI}, K_{1p}^X$  - коэффициенты разложения полей аномалий давления воздуха у поверхности земли за март, апрель, июнь и октябрь.

Нижние индексы указывают на номер коэффициента разложения. В таблице 3 приводятся значения собственных векторов разложения соответствующих полей аномалий приземного давления. Коэффициенты уравнения регрессии (11) и оценка его прогностической значимости для характерных участков р. Дунай даны в таблице 4. Уравнение, построенное на предикторах, полученных в результате дискриминантного анализа (схема 2), имеет вид

$$\Delta D = A_0 + A_1 z_p^{III} + A_2 z_p^{IV} + A_3 z_p^{VI} + A_4 z_p^X + A_5 z_t^{III}, \quad (12)$$

где  $z_p^{III}, z_p^{IV}, z_p^{VI}, z_p^X$  - предсказатели по полям давления за март, апрель, июнь и октябрь;

$z_t^{III}$  - предсказатель по полям температуры воздуха за март.

Названия станций, информация которых используется для получения первых собственных векторов  $U$  (таблица 6), приводятся в таблице 5.

Коэффициенты уравнения (12) и оценка его прогностических свойств для отдельных участков р. Дунай даны в таблице 7.

Средняя заблаговременность прогнозов по зависимостям (11) и (12) составляет порядка 2 месяцев.

Оценки применимости разработанных методик (таблицы 4 и 7) оказались вполне приемлемыми и полностью удовлетворяют требованиям Наставления.

Таблица 3

Собственные векторы аномалии давления  $X_p$  и температуры воздуха  $X_t$  (схема 1)

| № №<br>п/п | $X_{1p}^{III}$ | $X_{2p}^{IV}$ | $X_{3p}^{IV}$ | $X_{1p}^{VI}$ | $X_{1p}^X$ |
|------------|----------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| 1          | 0,3866         | -0,0040       | -0,3021       | -0,3887       | 0,3981     |
| 2          | 0,1842         | -0,3246       | 0,2205        | 0,5650        | 0,4486     |
| 3          | -0,2528        | 0,0029        | -0,0482       | 0,1078        | 0,2412     |
| 4          | 0,0686         | 0,0380        | -0,3648       | 0,1209        | 0,4898     |
| 5          | -0,2707        | 0,5382        | 0,0606        | 0,0578        | 0,1260     |
| 6          | 0,3186         | 0,5503        | 0,3432        | 0,2514        | 0,2902     |
| 7          | -0,1400        | -0,1068       | 0,1987        | -0,0872       | 0,3890     |
| 8          | -0,2802        | -0,1802       | -0,0685       | -0,0841       | -0,0484    |
| 9          | 0,2689         | -0,2247       | 0,5585        | 0,1452        | 0,2426     |
| 10         | -0,1400        | -0,1780       | -0,1094       | 0,4980        | 0,1517     |
| 11         | -0,3181        | -0,0306       | -0,0202       | -0,0273       | 0,0698     |
| 12         | 0,3182         | -0,0854       | -0,2151       | 0,1378        | -0,1008    |
| 13         | -0,2168        | -0,2622       | -0,2783       | -0,0799       | -0,0240    |
| 14         | -0,2255        | -0,0798       | -0,1658       | -0,2132       | 0,0592     |
| 15         | -0,3042        | 0,3406        | -0,3802       | -0,2891       | -0,0100    |

Коэффициенты уравнения (11) и оценка его прогностической значимости для отдельных участков Дуная

| Участок                            | $A_0$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | 0,6746 | R    | КПИ  | $\frac{S}{\bar{y}}$ | $P_{пр}$ | $P_M$ |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|------|---------------------|----------|-------|
| г. Братислава -<br>г. Будапешт (1) | 9,05  | -0,34 | -1,10 | -2,02 | -1,71 | 0,46  | 16,2   | 0,82 | 0,77 | 0,58                | 56       | 80    |
| г. Будапешт -<br>г. Нови Сад (2)   | 5,01  | -0,47 | -0,72 | -2,31 | -1,33 | 0,08  | 16,4   | 0,82 | 0,73 | 0,55                | 55       | 90    |
| г. Корабия -<br>г. Олтеница (3)    | 14,10 | -0,44 | -1,27 | -0,80 | -1,79 | 1,28  | 17,2   | 0,86 | 0,81 | 0,50                | 53       | 85    |
| ниже г. Олтеницы                   | 12,47 | -0,39 | -1,29 | -0,65 | -1,63 | 1,20  | 16,2   | 0,85 | 0,77 | 0,54                | 53       | 90    |

Таблица 5

Станции, данные которых используются при прогнозе  
по уравнению (12)

| № п/п | Давление    |                      |             |               | Температура    |
|-------|-------------|----------------------|-------------|---------------|----------------|
|       | март        | апрель               | июнь        | октябрь       |                |
| 1     | Коппермайн  | Рейкьявик            | Коппермайн  | Фэрбенко      | Красноярск     |
| 2     | о. Нантакет | м. Желания           | Чикаго      | Кадьяк        | Спокан         |
| 3     | Лиссабон    | Салехард             | о. Нантакет | Артик-Бей     | Денвер         |
| 4     | Рим         | Хатанга              | Ангмагсалик | о. Резольюшен | Виннипег       |
| 5     | Афины       | Иркутск              | Рейкьявик   | Мурманск      | Чикаго         |
| 6     | Казань      | Якутск               | Киев        | Салехард      | Мусони         |
| 7     | Оренбург    | о. Четырех-столбовой | Волгоград   | Датч-Харбор   | г. Санта-Мария |



Первые собственные векторы аномалии давления  $u_p$   
и температуры воздуха  $u_t$  (схема 2)

| №<br>п/п | III<br>$u_p$ | IV<br>$u_p$ | VI<br>$u_p$ | X<br>$u_p$ | III<br>$u_t$ |
|----------|--------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| 1.       | 0,0597       | -0,0093     | 0,0362      | 0,3101     | 0,2102       |
| 2.       | -0,1010      | -0,0282     | -0,1599     | -0,0882    | 0,1295       |
| 3.       | 0,0542       | 0,0278      | -0,2424     | -0,0155    | -0,0914      |
| 4.       | 0,2891       | 0,1000      | 0,3402      | -0,0105    | 0,3815       |
| 5.       | -0,0265      | -0,2092     | 0,2309      | -0,0092    | -0,2648      |
| 6.       | -0,4170      | 0,2496      | 0,1101      | 0,0791     | 0,2523       |
| 7.       | -0,0702      | -0,1582     | 0,1022      | 0,0307     | 0,1023       |

Таблица 7

Коэффициенты уравнения (12) и оценка его прогностической значимости для отдельных участков Дуная

| Участок                           | $A_0$ | $A_1$ | $A_2$  | $A_3$ | $A_4$ | $A_5$ | $0,674 \cdot \bar{b}$ | R    | KПИ  | $\frac{S}{b}$ | $P_{op}$ | $P_M$ |
|-----------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-----------------------|------|------|---------------|----------|-------|
| г. Братислава-<br>г. Будапешт (I) | 9,06  | -3,23 | -12,05 | 3,02  | 4,62  | -3,38 | 16,2                  | 0,83 | 0,73 | 0,57          | 56       | 82    |
| г. Будапешт-<br>г. Нови Сад (II)  | 7,04  | -5,24 | -9,88  | 2,69  | 4,03  | -2,00 | 16,4                  | 0,81 | 0,71 | 0,56          | 60       | 82    |
| г. Нови-Сад-<br>г. Олтеница (III) | 7,14  | -2,90 | -10,51 | 6,64  | 7,34  | -3,50 | 17,2                  | 0,87 | 0,80 | 0,51          | 53       | 90    |
| ниже г. Олтеницы (IV)             | 5,09  | -4,14 | -8,93  | 7,02  | 6,08  | -1,76 | 16,2                  | 0,86 | 0,78 | 0,52          | 53       | 88    |

## Техника составления прогнозов

### Схема 1

Для получения коэффициентов  $K$ , входящих в прогностическое уравнение (11), находится сумма (5) произведений аномалий давления в пунктах, указанных в таблице 2 на соответствующие значения элементов собственных векторов (таблица 3). Необходимые для прогноза  $\Delta D$  коэффициенты уравнения регрессии берутся из таблицы 4.

### Схема 2

Коэффициенты  $Z$ , входящие в зависимость (12) находятся, как сумма (10) произведений аномалий давления и температуры воздуха в пунктах, указанных в таблице 5, на соответствующие значения элементов первых собственных векторов (таблица 6). Требуемые для прогноза  $\Delta D$  коэффициенты уравнения регрессии берутся из таблицы 7.

К методике долгосрочного прогноза дат появления льда на Дунае - Солопенко Л.И., Шматалюк Л.Н., Щербак А.В.

В условиях неустойчивого ледового режима Дуная важно заблаговременно знать ожидаемый характер развития ледообразования в предстоящий осенне-зимний сезон. Решение этой задачи выполнялось в Украинском региональном научно-исследовательском институте Госкомгидромета СССР под общим руководством А.В.Щербака при разработке методов прогнозов появления льда на советском участке Дуная (1969-1970 гг.) и на Дунае ниже Девина (1977-1978 гг.); анализ синоптико-циркуляционных условий ледообразования и использование их количественных показателей для разработки методик долгосрочного прогноза развития ледообразовательных процессов выполнены Л.И.Солопенко и Л.Н.Шматалюк.

Сущность методики. Локальные синоптические процессы, вызывающие похолодания в исследуемом районе, обуславливаются макроциркуляционными процессами в атмосфере. Изучение связи процессов малого и большого масштаба помогает выявить некоторые закономерности в их развитии.

Исходными данными для анализа послужили аэро-синоптический архив и каталог макросиноптических процессов в классификации А.Л.Каца с 1938 по 1974 гг. и данные метеорологических наблюдений в бассейне Дуная.

Для получения количественной характеристики макропроцессов атмосферной циркуляции в данной работе используется классификация по индексам циркуляции, предложенная А.Л.Кацем. Для характеристики совокупного действия зональных и меридиональных составляющих циркуляции используется безразмерный общий индекс, представляющий отношение индекса меридиональности к индексу зональности.

Обозначив зональные процессы шифром "1", а меридиональные шифром "2", Кац выделил четыре возможных состояния общей циркуляции атмосферы:

- "11" - процессы зональные во всей зоне;
- "22" - процессы меридиональные во всей зоне;
- "12" - во всей зоне в среднем процессы зональные, но в северной ее половине - меридиональные;
- "21" - во всей зоне в среднем процессы меридиональные, но в северной ее половине - зональные.

В каждом состоянии циркуляции Кац выделил четыре формы, которые характеризуются географической локализацией высотных гребней и ложбин: З - гребень занимает западное положение относительно Европы, Ц - центральное положение, В - восточное положение, С - процессы смешанные, являющиеся комбинацией форм З и В. На основании этой классификации составлен каталог макропроцессов по естественным синоптическим периодам для зоны 35-70° с.ш.

и  $30^{\circ}$  з.д. -  $100^{\circ}$  в.д., который и используется в данной работе. Индексы циркуляции частично взяты готовыми из оперативных материалов Гидрометцентра СССР, а частично подсчитаны нами по материалам Киевского бюро погоды. Методика подсчета индексов подробно изложена в работе А.Л.Каца "Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы", Гидрометеиздат, Л., 1960, 270 с.

Рассчитанные для низовьев Дуная аномалии температуры воздуха (отклонения от нормы на  $3^{\circ}$  и больше для каждой формы циркуляции за октябрь-февраль) показывают, что чаще всего похолодания в исследуемом районе обуславливаются меридиональными процессами: при состоянии "22" - циркуляцией форм Ц, З и С; при состоянии "21" - циркуляцией формы З; довольно часто похолодания являются результатом процессов западного положения гребня при зональном состоянии циркуляции "11" и, наконец, очень редко похолодания осуществляются при атмосферных процессах с восточным положением гребня, т.е. циркуляцией формы В.

На основании изложенного можно предположить, что совокупность циркуляции названных форм определяет те погодные условия, под влиянием которых формируются ледовые явления в исследуемом районе.

Исходя из этого предположения, для каждого месяца года был подсчитан показатель N комплекса макропроцессов, представляющий собой разность числа случаев с процессами, обуславливающими в холодное время года адвекцию тепла и адвекцию холода. Для расчета величин N используется выражение

$$N = n_{22+11+21+12}^B - (n_{22+11+21}^3 + n_{22}^{Ц+С}),$$

где n - число дней с циркуляцией соответствующих форм при разных состояниях циркуляции атмосферы.

Годовой ход осредненных значений  $N$  по группам лет с разными сроками появления льда и при их отсутствии (рис.1) показывает, что каждой группе лет присущ свой год показателя  $N$ , особенно контрастный в августе-октябре. Данная контрастность периода август-сентябрь-октябрь в ходе показателя  $N$  используется в качестве прогностического признака для установления ожидаемого характера развития ледообразовательных процессов в низовьях Дуная.

Ход во времени значений показателя  $N$  в отдельно взятые годы не повторяет полностью хода его осредненных значений. Однако, отмеченные признаки временного хода  $N$  выдерживаются по группам 1 и 3 (годы с ранним и поздним появлением льда на советском участке Дуная) соответственно в 89 и 80%; по группам 2 и 4 (появление льда в нормальные сроки и годы с отсутствием ледовых явлений) - в 70-75%.

Таким образом, на основании выделенных признаков в ходе  $N$  от августа к октябрю уже в конце октября можно с указанной выше вероятностью сказать, будет ли в текущем сезоне начало ледообразования ранним, поздним, близким к нормальным срокам или же не ожидается вовсе.

На рис.2 представлен годовой ход показателя комплекса макропроцессов в годы с ранним (1), нормальным (2), поздним (3) началом ледообразования и без ледовых явлений (4) для пяти участков Дуная ниже Девина: I. - пункты Братислава, Генью, Комаром, Надьмарош; II. - Будапешт, Дунафельдвар, Мохач, Нови-Сад; III. - Земун, Смеево, Турну-Северин; IV. - Калафат, Свиштов, Джурджу, Силистра и V. - Чернавода, Хыршова, Браила, Измаил.

Проверочные прогнозы начала ледообразования на разных участках Дуная, составленные на основе учета изменения показателя от августа к октябрю с использованием представленных на рис.2 графиков, показали, что с вероятностью 73-77% можно предвидеть характер развития процессов ледообразования на Дунае ниже Девина. Такие ориентировочные прогнозы дат появления льда могут состояться с 1 ноября.

Результаты выполненных исследований изложены в Трудах УкрНИГМИ, 1970, вып.97, с.63-69 и Трудах УкрНИИ Госкомгидромета, 1980, вып.183, с.70-76.

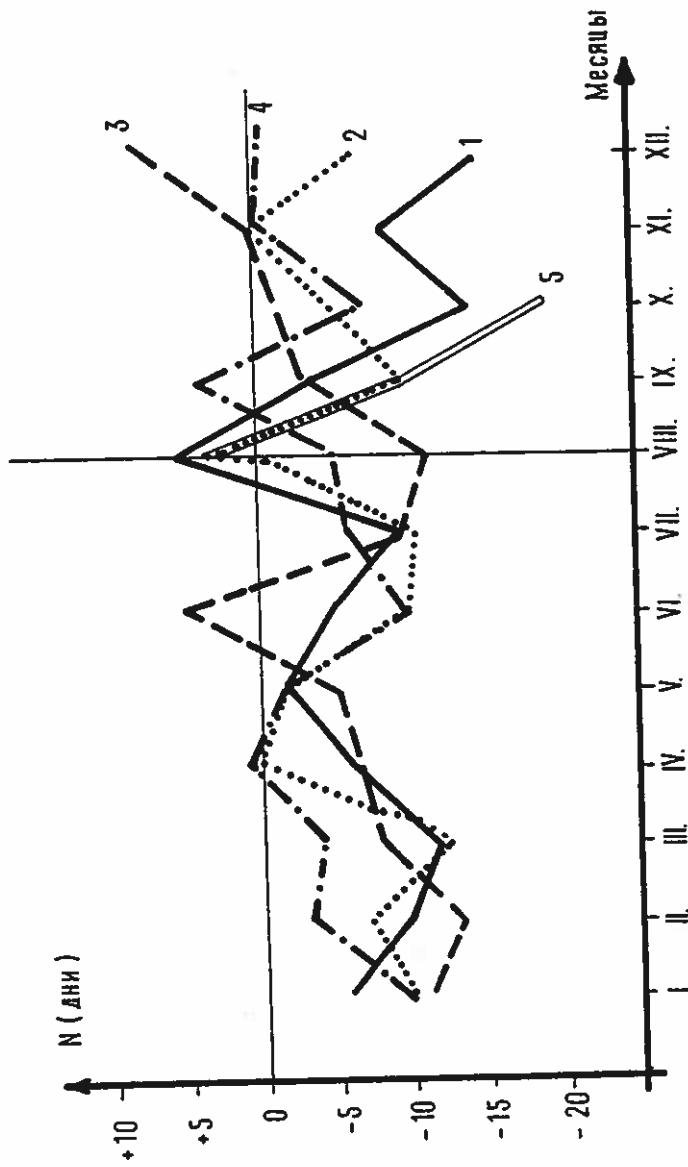
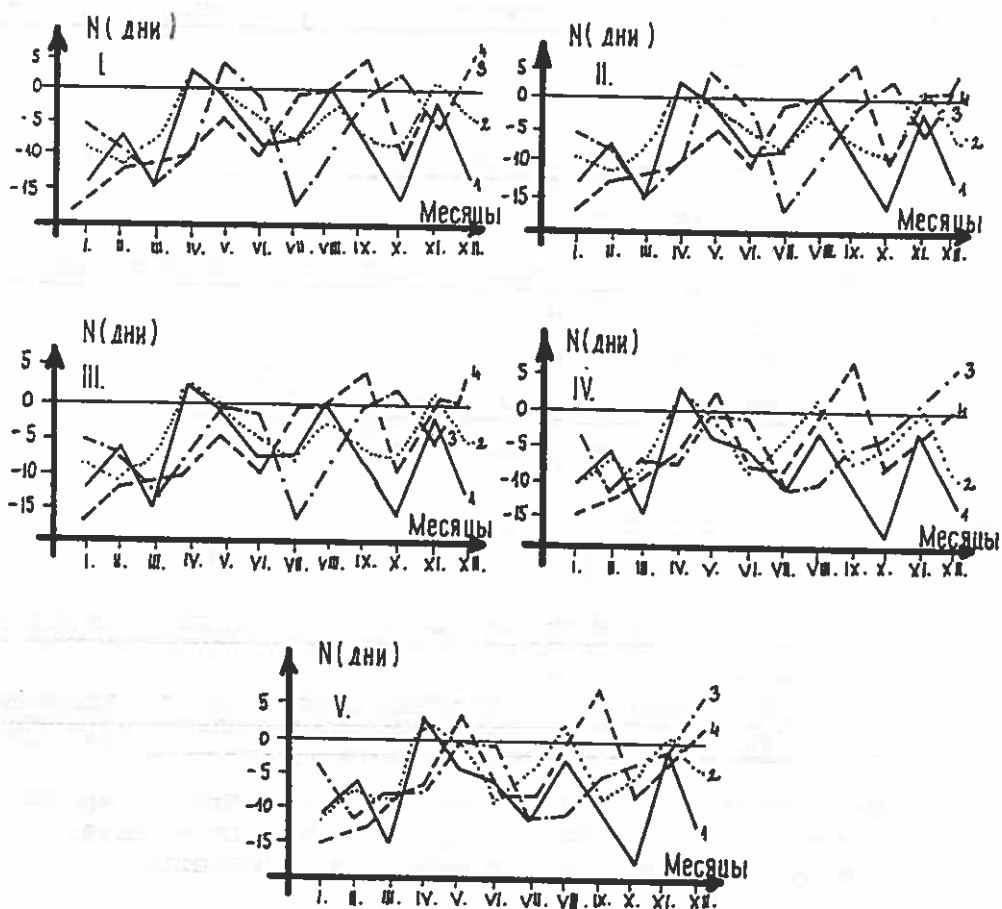


Рис.1. Годовой ход осредненного по группам лет показателя (г.Измаил, 1938-1968 гг.)

- 1 - годы раннего (не позже 25/ХП) начала ледообразования,
- 2 - годы нормального (26/ХП-19/1) начала ледообразования,
- 3 - годы позднего (позже 19/1) начала ледообразования,
- 4 - годы с отсутствием ледовых явлений,
- 5 - сезон 1969/1970 гг.

Рис. 2. Годовой ход показателя комплекса макропроцессов в годы с ранним (1), нормальным (2), поздним (3) началом ледообразования и в годы без ледовых явлений (4) на пяти (1-У) участках Дуная ниже Девины.





4.3.2. Методы краткосрочных прогнозов появления льда на Дунае

4.3.2.1. в Федеративной Республике Германии.

См. пункт 4.1.2.1.

4.3.2.2. в Австрийской Республике.

Краткосрочные прогнозы ледовых явлений также не составляются в Австрии. Однако существует соответствующая служба для оповещения судоходства.

4.3.2.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике.

См. пункт 4.1.1.3.

4.3.2.4. в Венгерской Республике.

См. пункт 4.3.1.4.

4.3.2.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии.

См. пункт 4.1.2.5.

4.3.2.6. в Республике Болгарии.

Материалы не получены.

4.3.2.7. в Румынии.

См. пункт 4.3.1.7.

4.3.2.8. в Союзе Советских Социалистических Республик.

"Краткосрочные прогнозы появления льда на советском участке Дуная" - Щербак А.В.

Ледовый режим на советском участке Дуная характеризуется большой неустойчивостью во времени - начало ледообразования здесь может наблюдаться в течение всего

зимнего периода. В таких условиях большое значение имеют прогнозы ледовых явлений, и в частности, краткосрочные прогнозы появления льда.

Излагаемые ниже методика краткосрочного прогноза и схема расчета появления плавучего льда в низовьях Дуная разработаны в Украинском региональном научно-исследовательском институте Госкомгидромета СССР в 1969-1970 гг. А.В.Шербаком при участии М.С.Делеур.

Прогнозы появления плавучего льда на реках с за-  
благовременностью в несколько дней составляются по эм-  
пирическим зависимостям или расчетным путем с использо-  
ванием прогноза температуры воздуха.

Физико-статистическая (эмпирическая) зависимость  
для краткосрочного прогноза появления льда

Сущность методики. При составлении краткосрочных прогнозов появления льда широко применяются физико-ста-  
тистические или эмпирические зависимости величин сум-  
марной теплоотдачи (или ее относительных характеристик),  
необходимой для начала ледообразовательных процессов, от  
определяющих факторов. При этом чаще всего используются  
зависимости вида  $\sum \theta_- = f(\nu)$  или  $\sum \theta_- = f(\nu, h)$

где  $\sum \theta_-$  - сумма средних суточных отрицательных темпе-  
ратур воздуха, необходимая для появления льда;

$\nu$  и  $h$  - соответственно температура воды и глубина ре-  
ки накануне или в день перехода температуры  
воздуха к отрицательным значениям.

Вместо величины  $h$ , как характеристики влияния водности  
реки на процесс ледообразования, часто применяется зна-  
чение уровня  $H$  или расхода  $Q$  воды.

При составлении краткосрочного прогноза появления  
льда приведенные зависимости служат для установления ми-  
нимальной суммы отрицательных температур воздуха ( $\sum \theta_-$ )  
мин,  
необходимой для начала ледообразования. Необходимая для

появления льда сумма отрицательных температур воздуха в каждом конкретном случае определяется интенсивностью теплоотдачи и запасами тепла в речном потоке.

На рис. 1 приведена зависимость минимальной суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха  $(\sum \theta_-)_{\text{мин}}$ , необходимой для появления плавучего льда у г.Измаила, от температуры воды  $\psi_n$  и расхода воды у Измаильского Чатала  $Q_n$  накануне перехода температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$  к отрицательным значениям. При этом были взяты все случаи перехода температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$  в течение осенне-зимнего сезона. Такой подход исключает необходимость заблаговременного знания того, будет ли данный переход температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$  устойчивым или нет.

Аналитическое выражение полученной зависимости имеет вид:

$$(\sum \theta_-)_{\text{мин}} = A \psi_n^{1,29}$$

Величина параметра  $A$  определяется в зависимости от расходов воды: при  $Q_n > 4500 \text{ м}^3/\text{с}$   $A = 10,5$ ; при  $Q_n$  от 4500 до 3500  $\text{м}^3/\text{с}$   $A = 7,2$ ; при  $Q_n < 3500 \text{ м}^3/\text{с}$   $A = 4,9$  (соответственно кривые 1-3 на рис.1). Введением расходов воды косвенным образом учитывается теплозапас водного потока: чем больше водность реки, тем большая (при прочих равных условиях) сумма холода требуется для охлаждения воды до значений, близких к  $0^\circ\text{C}$ .

Расчет сроков появления льда на Дунае у Измаила с использованием полученной зависимости дает вполне удовлетворительные результаты: в 94% случаев проверочных прогнозов ошибка не превышает допустимую, равную 2 дням.

Схема составления прогноза. Краткосрочный прогноз появления льда на Дунае у г.Измаила дается в день перехода средней суточной температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$  по зависимости на рис.1. Сведения о температуре воды  $\psi_n$  берутся по данным наблюдений у Измаила, о расходе воды

$Q_H$  - по Измаильскому Чаталу накануне перехода температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  (по данным метеостанции Измаил). Значение  $Q_H$  при этом снимается с кривой по величине уровня воды.

По значениям  $U_H$  и  $Q_H$  с рис.1 снимается  $(\sum \Theta_-)_{\text{мин}}$ , необходимая для появления льда. Ожидаемая дата появления льда принимается на второй день после накопления  $(\sum \Theta_-)_{\text{мин}}$ , найденной по прогнозу температуры воздуха. В случае интенсивного похолодания (среднесуточная температура воздуха ниже  $-5^{\circ}$ ) дата появления льда определяется по дате накопления  $(\sum \Theta_-)_{\text{мин}}$ .

Расчет времени появления льда по методу Л.Г.Шуляковского.

Эмпирические зависимости, применяемые в практике выпуска краткосрочных прогнозов появления льда, являются строго локальными. Для их построения необходим длительный период наблюдений за ледовыми явлениями. Учитывая данное обстоятельство, Л.Г.Шуляковским (Гидрометцентр СССР) разработан метод, позволяющий производить расчеты появления льда для целей краткосрочных прогнозов при недостатке или отсутствии данных наблюдений над ледовыми явлениями.

Применение данного метода для расчетов времени появления льда на советском участке Дуная выполнено с учетом специфических условий рассматриваемого района.

Расчетный метод основан на решении уравнения теплового баланса поверхности воды, которое может быть записано в следующем виде:

$$A + B = 0. \quad (1)$$

Здесь  $A$  - тепловой поток между водной массой и поверхность раздела вода-воздух,

$B$  - результирующая (на водной поверхности) тепловых потоков лучистого теплообмена  $R$ ,

испарения и конденсации LE и турбулентного обмена теплом водной поверхности с воздухом P.

Величину A можно представить в виде

$$A = \mathcal{L} ( \mathcal{V} - \mathcal{V}_{\text{пв}} ), \quad (2)$$

где  $\mathcal{L}$  - коэффициент теплоотдачи (коэффициент подачи тепла из водной массы к поверхности раздела вода-воздух),

$\mathcal{V}$  - средняя в сечении или по глубине температура воды,

$\mathcal{V}_{\text{пв}}$  - температура поверхности воды.

Тогда уравнение теплового баланса (1) можно записать в виде

$$\mathcal{L} ( \mathcal{V} - \mathcal{V}_{\text{пв}} ) + B = 0 \quad (3)$$

Ледообразование на поверхности реки начинается тогда, когда температура поверхности воды понижается до температуры замерзания и теплоотдача водной поверхности становится больше притока тепла к ней из водной массы. Исходя из этого, Шуляковским получено следующее выражение для условий начала ледообразования:

$$\mathcal{V}_n \leq - \frac{B_n}{\mathcal{L}_n} . \quad (4)$$

Неравенство (4) показывает, что для момента n, когда  $\mathcal{V}_{\text{пв}} = 0$ , ледообразование на поверхности воды становится возможным тогда, когда средняя в течение или по глубине температура воды  $\mathcal{V}_n$  оказывается меньше (или равной) величине  $-\frac{B_n}{\mathcal{L}_n}$ .

Таким образом, расчет времени появления льда по методу Шуляковского сводится к определению на заданный момент времени n следующих величин:

- а) средней в сечении или по глубине температуры воды  $U_i$
- б) теплоотдачи водной поверхности  $B_n$ ,
- в) коэффициента теплоотдачи  $\alpha_n$ .

В результате решения дифференциального уравнения изменения температуры в речном потоке Л.Г. Шуляковским получен ряд приближенных выражений, позволяющих рассчитать температуру воды на заданный момент времени.

Рассматриваемый в настоящей работе участок Дуная находится на крайнем юго-западе ЕТС, где температурный режим в осенне-зимний период отличается большой неустойчивостью, с резкими изменениями температуры воздуха в период охлаждения воды. На значительном своем протяжении исследуемый участок характеризуется умеренными грунтовым питанием. Применительно к таким условиям может быть использовано следующее выражение для расчета температуры воды:

$$U_n = U_0 e^{-na_0} + \sum_{i=1}^n \left[ \Theta_i (e^{-(n-i)a_0} - e^{-(n-i+1)a_0}) \right] + \left[ \frac{d}{k} + \frac{\alpha+k}{\alpha \cdot k} (q_L + q_R + q_3) \right] (1 - e^{-na_0}) \quad (5)$$

где  $a_0 = \frac{t \cdot \alpha \cdot k}{(\alpha + k) \cdot h \cdot c \cdot \rho}$

Здесь  $U_n$  - средняя в сечении или по глубине температуры воды в расчетном створе на заданный момент времени,

$U_0$  - температура верхнего слоя воды в начальном створе, взятая с учетом времени добегаания от начального до расчетного створа;

$n$  - число суток от начала расчета (продолжительность расчетного периода),

- $i$  - порядковый номер суток от начала расчета,  
 $\theta_i$  - средняя температура воздуха за  $i$ -тые сутки,  
 $\mathcal{L}$  - коэффициент теплоотдачи,  
 $k$  - коэффициент теплообмена,  
 $d$  - удельный теплообмен при температуре воздуха,  
 равной температуре поверхности воды;  
 $t$  - единица времени (сутки),  
 $h$  - средняя на участке глубина,  
 $c$  - удельная теплоемкость воды,  
 $\zeta$  - плотность воды,  
 $q_{\mathcal{L}}$ ,  $q_{\Gamma}$  и  $q_{\mathcal{E}}$  - удельный теплоприход соответственно от  
 ложа реки, с подземными водами и всле-  
 дствие диссипации энергии.

Тогда условие начала ледообразования можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \nu_0 e^{-na_0} + \sum_{i=1}^n \left[ \theta_i (e^{-(n-i)a_0} - e^{-(n-i+1)a_0}) \right] + \\
 & + \left[ \frac{d}{k} + \frac{\mathcal{L}+k}{\mathcal{L}k} (q_{\mathcal{L}} + q_{\Gamma} + q_{\mathcal{E}}) \right] (1 - e^{-na_0}) \leq - \frac{Bn}{\mathcal{L}n}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Расчет времени появления льда на Дунае у г.Измаила сводится к решению вышеприведенного неравенства (6). При этом были использованы материалы наблюдений за ледовыми явлениями, гидрометрическими характеристиками (уровни и расходы воды, скорость течения), температурой воды и воздуха, скоростью ветра и облачностью за период с 1953 по 1966 гг. Эти данные взяты из материалов наблюдений Дунайской гидрометобсерватории, метеорологических ежегодников СРР и гидрологических ежегодников реки Дунай, издаваемых Дунайской Комиссией.

В качестве начального створа выбран пункт Калафат. Протяженность реки от Калафата до Измаила составляет 742 км. Выбор данного расчетного участка обусловлен наличием исходных данных и необходимостью увязки заблаговременности прогноза времени появления льда с заблаговременностью прогноза метеозаэlements. Последняя, как известно, равна в среднем 3-5 дней. Коэффициент теплоотдачи определялся по следующей формуле:

$$\mathcal{L} = (1660 u + 170 \omega) c_p \quad \text{кал/см}^2 \text{ сут град}, \quad (7)$$

где  $u$  - средняя скорость течения, м/с;

$\omega$  - скорость ветра, м/с.

Вычисление величины  $B_n$  производится по известным формулам для расчета эффективного излучения, испарения и турбулентного обмена теплом.

Величина коэффициента  $k$  определяется в зависимости от скорости ветра, температуры воды и воздуха, а параметра  $d$  - в зависимости от географической широты, даты и скорости ветра. Значения удельного теплообмена  $d$  при этом определяются на основании данных наблюдений метеостанции Измаил по уравнению

$$d = Q + J'_3 + LE' \quad \text{кал/см}^2 \text{ сут} \quad (8)$$

где  $Q$  - теплоприход солнечной радиации,

$J'_3$  и  $LE'$  - соответственно эффективное излучение и теплообмен в связи с испарением при температуре воздуха, равной температуре поверхности воды.

Необходимая для расчета  $LE'$  величина влажности воздуха ( $e_{200}$ ) определяется по связи  $e_{200}$  с температурой воздуха ( $\Theta_{200}$ ). Для данного района получена достаточно тесная зависимость  $e_{200}$  от  $\Theta_{200}$ , которая может быть представлена в виде

$$e_{200} = e^{0,008 \Theta_{200} + 1,6}$$



Порядок расчета величин  $\mathcal{L}_n$ ,  $\mathcal{L}_n$  и  $B_n$  подробно изложены в Руководстве по гидрологическим прогнозам, вып. 4, Гидрометеиздат, Л., 1963 и Трудах УкрНИГМИ, 1971, вып. 104, с.57-68.

Результаты расчета температуры воды и времени появления льда на Дунае у г.Измаила по изложенной методике показали: в 83% подсчетов ошибка равна 0 и только в одном случае (из 23) она достигает 3 дня. Обеспеченность ошибки не более 1 дня составляет 87% и не более 2 дней - 97%.

Использование данного метода для прогноза дат появления льда предполагает использование прогноза основных метеоэлементов с заблаговременностью 3-5 суток.

Рис. 1. Зависимость минимальной суммы среднесуточных отрицательных температур воздуха  $(\sum \theta_-)_{\text{мин}}$ , необходимой для появления плавучего льда на Дунае у г.Измаила, от температуры воды  $\mathcal{U}_H$  и расходов воды  $\theta_H$  у Измаильского Чатала накануне перехода температуры воздуха через  $0^{\circ}$ .

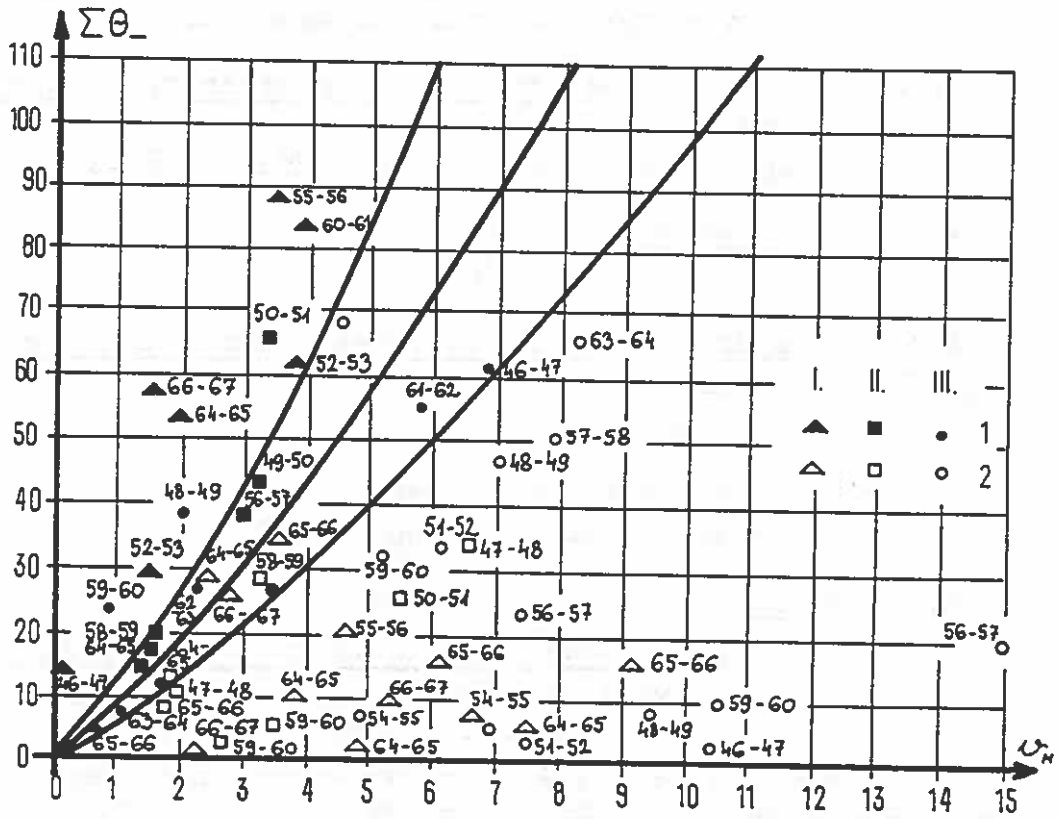
I. -  $Q_H > 4500 \text{ м}^3/\text{с}$ , II. -  $Q_H = 4500-3500 \text{ м}^3/\text{с}$ ,

III. -  $Q_H < 3500 \text{ м}^3/\text{с}$ .

1 - лед появился, 2 - лед не появился,

У точек - годы. (см. стр. 159).

Рис. 1.



4.3.3. Методы долгосрочного прогноза вскрытия льда на Дунае

4.3.3.1. в Федеративной Республике Германии.

См. пункт 4.1.2.1.

4.3.3.2. в Австрийской Республике.

В этой области в Австрии также не составляются прогнозы данного явления.

4.3.3.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике.

См. пункт 4.1.1.3. (не составляются).

4.3.3.4. в Венгерской Республике.

См. пункт 4.3.1.4.

4.3.3.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии.

См. пункт 4.1.2.5.

4.3.3.6. в Республике Болгарии.

Материалы не получены.

4.3.3.7. в Румынии.

О продолжительности ледостава на Дунае.

Д-р П.Мита, Г.Андрееску - Институт метеорологии и гидрологии, Бухарест, Румыния.

Как известно, на Дунае по оправданным причинам защиты, толщина льда не измеряется так, как на других внутренних водных путях.

Именно поэтому при анализе продолжительности ледостава на этой реке были учтены результаты предыдущих исследований, проведенных по вопросу продолжительности ледостава на внутренних водных путях, а именно:

а) изучение зависимости толщины льда ( $H_g$ ) и суммы отрицательных температур воздуха ( $\sum t_{\text{воздух}}^-$ )

$$H_g = A \left( \sum t_{\text{воздух}}^- \right)^n$$

где:  $A$  - коэффициент пропорциональности,

$n$  - коэффициент, имеющий величину около 0,5;

б) изучение связи между количеством дней периода разрушения льда (речь идет об интервале со дня измерения максимальной толщины льда до полного очищения реки), максимальной толщиной и среднесуточной температурой воздуха в течение рассматриваемого интервала.

Исходя из ранее установленных зависимостей, для определения общей продолжительности ледостава была достигнута следующая формула:

$$N = \mathcal{L} \sqrt{\sum t^-} + \beta$$

где:  $\mathcal{L}$  - коэффициент пропорциональности,

$\beta$  - термин, выражающий воздействие других факторов.

При анализе продолжительности ледостава реки выявился и другой фактор, а именно: давление, оказываемое увеличивающимся расходом воды на ледяной покров.

На участках больших размеров, как например, на Нижнем Дунае можно полагать, что давление изменяется пропорционально увеличению "С" (м<sup>3</sup>/с/день) расходов воды, и это, в свою очередь, вызывает сокращение количества дней N, согласно зависимости, выраженной в следующем виде:

$$N = \alpha \sqrt{\sum t^-} - \gamma C \pm \omega$$

где  $\pm \omega$  представляет реманентную величину.

Для гидрометрических станций Тульча и Джурджу было установлено соотношение  $N=f(\sum t^-, C)$  с помощью двумерной двойной корреляции между величинами N,  $\sum t^-$  и (-C).

План регрессии величины N для переменных " $\sum t^-$  и (-C)" выражается следующим образом:

$$N - \bar{N} = b_1 (\sum t^- - \overline{\sum t^-}) + b_2 (C - \bar{C})$$

где N,  $\overline{\sum t^-}$ ,  $\bar{C}$  представляют средние величины рядов N,  $\sum t^-$ , C, а  $b_1$  и  $b_2$  определяются коэффициентом корреляции и стандартными отклонениями, обнаруженными в трех рядах величин.

Следующие уравнения были получены:

$N = 4,7 \cdot \sqrt{\sum t^-} - 0,6C + 14,3$  - для гидрометрической станции Тульча, с общим коэффициентом корреляции  $R=0,918$ , и  
 $N = 3,72 \cdot \sqrt{\sum t^-} - 0,024C - 5,4$  - для гидрометрической станции Джурджу, с общим коэффициентом корреляции  $R = 0,975$ .

Графические зависимости, представленные на рис.1, показывают, что в водомерном посту Тульча возможная максимальная продолжительность ледостава составляет около 95-100 дней, а в водомерном посту Джурджу - около 75-80 дней, что соответствует максимальным величинам, зарегистрированным в течение периода наблюдения (81 день в Тульче и 69 дней в Джурджу).

Одновременно следует отметить, что если продолжительность ледостава в течение нескольких зимних периодов является особенно длинной, зависимость прогноза не является надежной, так как в случае особенно длинных периодов точность метеорологических прогнозов уменьшается.

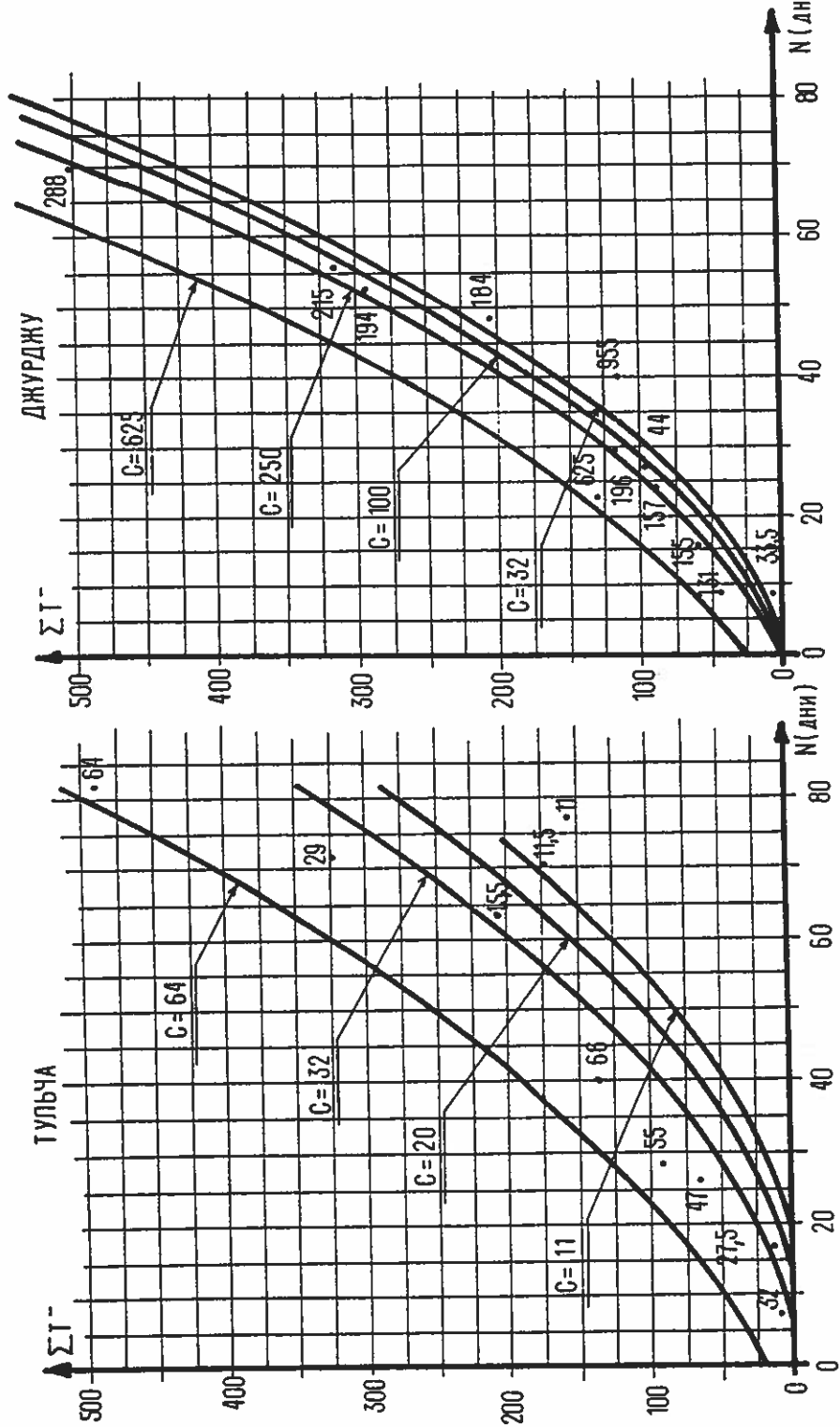


Рис.1. Зависимость  $N=f(t, c)$  для гидрометрических станций Тульча и Джурджу

## Литература

1. C.Diaconu - Possibilités de prevision des niveaux dans les conditions d'existence de la prise de fleuve sur le Danube.  
La III-ème Conference internationale portant sur les prevision hydrologiques des pays danubiens. Bucarest, 1965.
2. D.Dumitrescu  
La prevision à longue échéance portant sur l'apparition de la prise de fleuve et du debacle sur le Danube.  
La VII-ème Conference portant sur les prevision hydrologiques des pays danubiens Regensburg, 1975 (Konferenzbericht Koblenz, 1977).
3. P.Mita  
Possibilités de prevision de l'apparition et de l'évolution de la prise de fleuve sur le Danube inferieur.  
La V-ème Conference portant sur les previsions hydrologiques des pays danubiens. Belgrad, 1969 (Zbornik dokladov, Belgrad, 1970).
4. P.Mita  
Méthode de prevision de l'apparition de la prise de fleuve influencé par la température de l'air et le debit d'eau.  
La VII-ème Conference portant sur les prevision hydrologiques des pays danubiens.  
Regensburg, 1975 (Konferenzberich Koblenz 1977).
5. P.Mita  
G.Andreescu  
On ice bridge fenomenan occurrence on the Danube.  
XIII Conference of the Danube countries on hydrological forecasts. Belgrad, 1986.
6. M.Podani  
Les glaçons sur le Danube durant l'intervalle janvier-mars 1985. Genèse, effets, mesures et conclusions. Hidrotehnica, vol.30 nr.7, 1985, Bucuresti.



4.3.3.8. в Союзе Советских Социалистических Респу-  
блик.

"Методы краткосрочного и долгосрочного  
прогноза вскрытия советского участка Ду-  
ная" - Щербак А.В., Шматалюк Л.Н.

Излагаемые ниже методы краткосрочного и долгосрочного прогноза вскрытия советского участка Дуная разработаны в Украинском региональном научно-исследовательском институте Госкомгидромета СССР в 1976 г. под руководством А.В.Щербака; исследование синоптических условий вскрытия реки выполнено Л.Н.Шматалюк.

Методы краткосрочного прогноза вскрытия.

Сущность метода. Существующие методы краткосрочного прогноза вскрытия рек основываются на учете теплоприхода к ледяному покрову путем введения в расчет характеристик температуры воздуха или путем расчета теплообмена по метеорологическим данным.

Материалы многолетних наблюдений за толщиной ледяного покрова и сроками вскрытия на советском участке Дуная показывают, что вскрытие здесь чаще всего происходит под воздействием теплового фактора и обычно не связано со значительными подъемами уровней воды. Вследствие неустойчивости температурного режима зимних периодов в исследуемом районе средняя толщина ледяного покрова на Дунае ниже Рени и в Килийском рукаве его дельты к моменту весеннего потепления составляет обычно 15-25 см.

Учитывая изложенное, была предпринята попытка разработать методику краткосрочного прогноза сроков вскрытия советского участка Дуная, основываясь на учете теплоприхода к ледяному покрову путем введения в расчет характеристик температуры воздуха.

Принимая во внимание незначительные колебания в разные годы рассматриваемого периода (1946-1975 гг.) суммы положительных среднесуточных температур воздуха ( $\sum \Theta_+$ ), необходимой для вскрытия, и периода её

накопления, исходным пунктом при разработке методики прогноза явилось положение, что может быть некоторый предел  $\sum \Theta_+$ , период накопления которого коррелируется с периодом накопления необходимой для вскрытия  $\sum \Theta_+$ .

В результате анализа хода температуры воздуха во время оттепелей и в период после окончательного ее перехода через  $0^\circ\text{C}$  установлено, что таким пределом  $\sum \Theta_+$  может служить  $12^\circ\text{C}$ . На рис.1 представлены зависимости дат вскрытия реки в створах Рени, Измаил, Килия и Вилково от даты накопления  $\sum \Theta_+ = 12^\circ\text{C}$ . В качестве третьей переменной учитывается сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха  $\sum \Theta_-$  от даты установления ледостава до даты окончательного перехода температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$  к положительным значениям, как косвенная характеристика толщины ледяного покрова.

Оценка полученных зависимостей путем составления проверочных прогнозов показала, что они имеют удовлетворительную точность. В целом из составленных 21 проверочных прогнозов не оправдалось по пунктам Рени, Измаил и Килия 3 прогноза и по пункту Вилково - 4. Без учета случаев искусственного взламывания ледяного покрова в 1963 и 1969 гг. обеспеченность допустимой погрешности прогнозов составляет 91-96%. Заблаговременность прогноза для указанных пунктов в среднем составляет 2 дня при  $\sum \Theta_- < 100^\circ\text{C}$ , 4-5 дней при  $\sum \Theta_-$  от 100 до  $300^\circ\text{C}$  и 10-14 дней при  $\sum \Theta_- > 300^\circ\text{C}$ .

Схема составления краткосрочного прогноза. Краткосрочный прогноз сроков вскрытия на советском участке Дуная с использованием связей на рис. 1 составляется в день накопления суммы положительных температур воздуха, равной  $12^\circ\text{C}$ , в зависимости от накопившейся до данного перехода температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$  суммы отрицательных температур воздуха, начиная с даты установления ледостава в интересующем нас створе реки.

Сведения о температуре воздуха берутся по данным наблюдений метеостанции Измаил.

Заблаговременность прогноза может быть увеличена на 2-3 дня при использовании данных о температуре воздуха по прогнозу погоды.

Метод долгосрочного прогноза вскрытия.

Сущность метода. Как отмечалось ранее, сроки вскрытия на советском участке Дуная определяются в основном интенсивностью потеплений. В связи с этим важное значение приобретает исследование синоптико-циркуляционных условий для оценки ожидаемого характера развития процесса разрушения ледяного покрова в предстоящем зимне-весеннем сезоне.

Преобразование атмосферных процессов от сезона к сезону выражается в изменении теплового потока в тропосфере. Условия усиления или ослабления потеплений от одного сезона к другому можно при этом оценить с помощью анализа карт относительной топографии  $OT_{1000}^{500}$ . Б.М. Гинзбургом (Гидрометцентр СССР) установлено, что в холодный период года (с ноября по март) наблюдается устойчивый горизонтальный градиент  $H_{1000}^{500}$ , направленный на южные и центральные районы ЕТС с юго-запада. Увеличение этого градиента от прошлого сезона к настоящему обуславливает в следующем сезоне увеличение выноса тепла, а уменьшение градиента - ослабление потеплений. Данное положение принято за основу при разработке метода долгосрочного прогноза сроков вскрытия низовьев Дуная.

Для определения характеристики потеплений были выделены два периода: 1-31 января (первая половина зимы) и 1-28 февраля (вторая половина зимы).

Суммарная характеристика потеплений за эти периоды определялась следующим образом: выделялись дни, когда среднесуточная температура воздуха (по данным метеостанции Измаил) повышалась по сравнению с наблюдаемой накануне и была выше  $-5^{\circ}\text{C}$ , т.е. за каждый день указанных периодов подсчитывалось превышение средней суточной температуры воздуха над  $-5^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta\theta = \theta + 5$ ).  $\sum\Delta\theta$  за данный период и принимается в качестве характеристики суммы потеплений. Разность  $\delta\sum\Delta\theta = \sum_{1/II}^{28/II} \Delta\theta - \sum_{1/I}^{31/I} \Delta\theta$  характеризует изменение интенсивности потеплений от первой половины зимы ко второй.

Зблаговременную оценку интенсивности потеплений в предстоящем периоде вскрытия можно получить по изменению потока тепла в тропосфере от предыдущего сезона к текущему, обусловленному изменением градиента относительного геопотенциала.

Величина изменения указанного градиента ( $\delta_{grad} \Delta H$ ) характеризуется разностью средних величин отклонений от нормы относительного геопотенциала в двух группах пунктов, расположенных в направлении господствующего переноса. Выделение этих двух районов производится с таким расчетом, чтобы исследуемый участок реки находился на границе раздела между западным (относительно данного участка реки) и восточным районами. Значения ( $\delta_{grad} \Delta H$ ) в выбранных районах подсчитывались от предзимья к первой половине зимы, в нашем случае  $\delta_{grad} \Delta H = \Gamma_{\frac{12.1}{2}} - \Gamma_{x1}$ .

Ожидаемая величина потеплений во второй половине зимы определялась по зависимости  $\delta \sum \Delta \Theta = f\left(\frac{\delta_{grad} \Delta H}{\Delta \Theta_1}\right)$  (рис. 2), где  $\overline{\Delta \Theta_1}$  - аномалия среднесуточной температуры января в исследуемом районе. Значение  $\overline{\Delta \Theta_1}$  определяется по данным 12 метеостанций на юго-западе ЕТС.

Оценка этой зависимости показала, что отношение  $\overline{\delta} / \overline{\sigma} = 0,66$ . При малой выборке исходной информации (11 случаев) данную связь можно считать удовлетворительной.

Определенная по данной связи величина  $\delta \sum \Delta \Theta'$  совместно с суммой фактических потеплений в январе  $\sum_{1.1.}^{31.1.} \Delta \Theta$  и является суммарной характеристикой потеплений ( $\sum \Delta \Theta'$ ), обуславливающей сроки вскрытия на исследуемом участке реки. Введением  $\sum_{1.1.}^{31.1.} \Delta \Theta$  учитывается влияние относительных потеплений в январе на состояние ледяного покрова (его толщину и прочность).

Зависимость средних на советском участке Дуная сроков вскрытия (в отклонениях от нормы) от значений  $\sum \Delta \Theta' = \sum_{1.1.}^{31.1.} \Delta \Theta + \delta \sum \Delta \Theta'$  представлена на рис. 2. В качестве третьей переменной принята сумма отрицательных температур воздуха за период с 16 декабря по 31 января  $\left(\sum_{16/x.11.}^{31.1.} \Theta_{-}\right)$  как косвенная характеристика толщины льда.

$\bar{S}/\bar{C} = 0,42$ , что позволяет рекомендовать ее для выпуска прогнозов сроков вскрытия низовьев Дуная. Обеспеченность допустимой погрешности составляет 91%. При выпуске прогноза 1 февраля средняя заблаговременность его составляет 20 дней, колеблясь от 8 при самом раннем вскрытии до 56 дней при самом позднем.

Схема составления долгосрочного прогноза вскрытия.  
Прогноз составляется 1 февраля. Порядок его составления следующий:

1. По данным о среднесуточной температуре воздуха по метеостанции Измаил подсчитывается сумма потеплений в январе ( $\sum_{1/1}^{31/1} \Delta \theta$ ) за дни, когда температура повышалась и была выше  $-5^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta \theta = \theta + 5$ ), а также сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха за период с 16/XII по 31/1 ( $\sum_{16/XII}^{31/1} \theta_{-}$ ).

2. По данным Гидрометцентра СССР о величине отклонения от нормы относительного геопотенциала  $\Delta H_{1000}^{500}$  рассчитываются следующие величины:

а) среднее значение  $\Delta H_{1000}^{500}$  по опорным точкам в каждом из выделенных районов и его разницу от одного района к другому ( $\delta_{grad} \Delta H$ ) в ноябре, декабре и январе;

б) изменение градиента  $\Delta H_{1000}^{500}$  от предзимья к первой половине зимы.

3. По данным метеорологических станций Ивано-Франковск, Черновцы, Хмельницкий, Винница, Могилев-Подольский, Умань, Любашовка, Сербка, Кишинев, Одесса, Херсон и Измаил определяется аномалия среднемесячной температуры воздуха за январь ( $\Delta \theta_1$ ).

4. По величине отношения  $\frac{\delta_{grad} \Delta H}{\Delta \theta_1}$  определяется величина изменения потеплений от первой половины синоптического сезона зимы ко второй ( $\delta \sum \Delta \theta$ ).

5. По значениям  $\sum_{4/1.}^{31/1.} \Delta\theta + \delta \sum \Delta\theta'$  и  $\sum_{16/II.}^{31/1.} \ominus_-$  с помощью зависимости на рис.2 определяется ожидаемая дата вскрытия в отклонениях от нормы. Дата вскрытия  $D_B = \bar{D}_B + \Delta T$ , где  $\bar{D}_B$  - 21 февраля.

Допустимая погрешность прогноза  $\delta_{\text{доп.}} = 8$  дней.

Результаты исследования по разработке методов краткосрочного и долгосрочного прогноза сроков вскрытия на советском участке Дуная изложены в Трудах УкрНИГМИ, 1978, вып. 166, с.116-124.

Рис. 1. Зависимость дат вскрытия Дуная ( $D_B$ ) у Рени (а), Измаила (б), Килии (в) и Вилково (г) от даты накопления суммы положительных среднесуточных температур воздуха, равной  $12^\circ$  ( $D_{12}$ ), и суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха за период ледостава ( $\sum \ominus_-$ ).  
 у точек: в числителе - годы, в знаменателе -  $\sum \ominus_-$

Рис. 1. Продолжение.

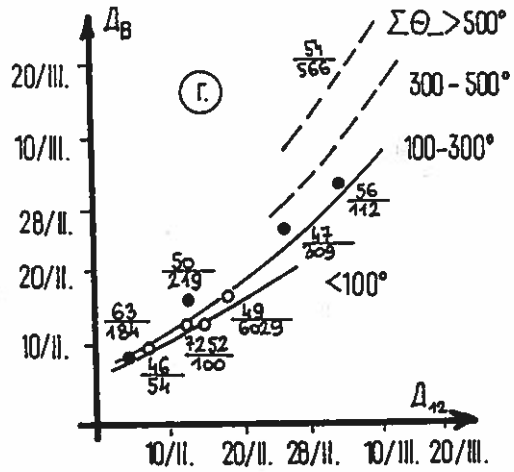
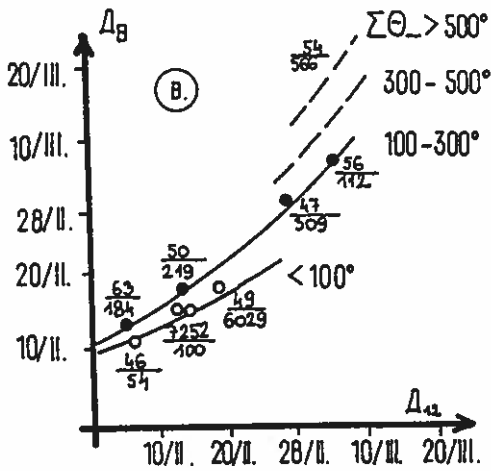
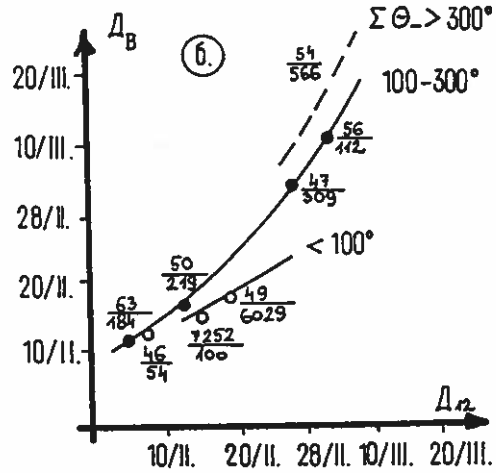
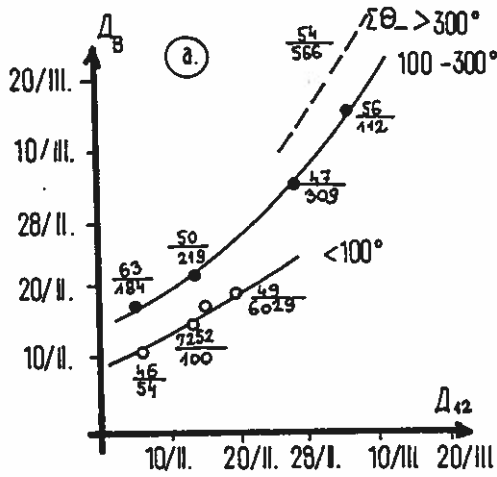


Рис. 2. а) Изменение суммы потеплений от первой половины зимы ко второй ( $\delta \sum \Delta \theta$ ) в зависимости от предшествующих изменений градиента относительного геопотенциала ( $\delta_{grad} \Delta H$ ) и аномалии температуры воздуха в январе ( $\Delta \theta$ ); у точек - годы.

б) Зависимость отклонений от нормы сроков вскрытия советского участка Дуная ( $\Delta T$ ) от суммарной характеристика потеплений ( $\sum_{17/I}^{31/I} \Delta \theta + \delta \sum \Delta \theta$ ) и суммы отрицательных температур воздуха  $\sum_{16/XII}^{31/I} \theta$  за период 16/ХП-31/1.

у точек - в числителе годы, в знаменателе - менее  $150^{\circ}$  (I),  $150-250^{\circ}$  (II) и более  $250^{\circ}$  (III).

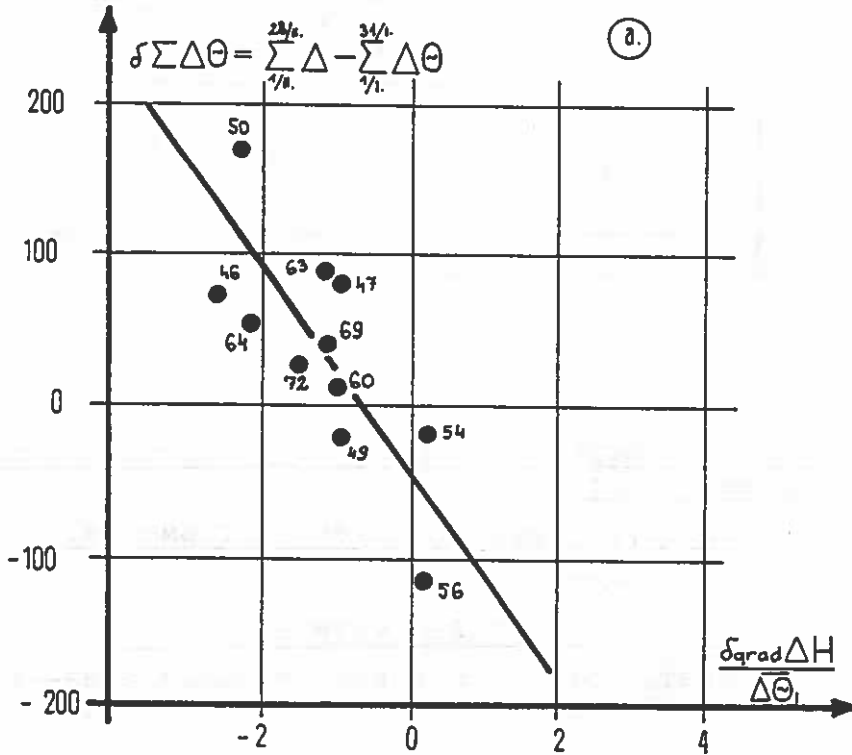
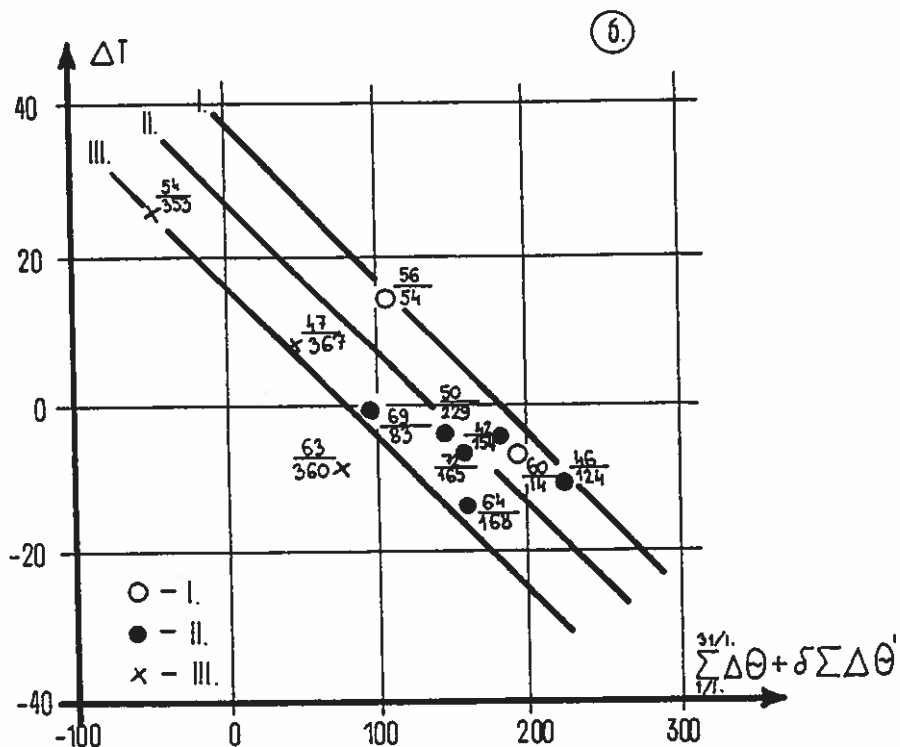




Рис. 2. Продолжение.



4.3.4. Методы краткосрочного прогноза установления ледостава на Дунае:

4.3.4.1. в Федеративной Республике Германии.

См. пункт 4.1.2.1.

4.3.4.2. в Австрийской Республике.

Краткосрочные прогнозы установления ледостава также не составляются в Австрии.

4.3.4.3. в Чешской и Словацкой Федеративной Республике.

См. пункт 4.1.1.3.

4.3.4.4. в Венгерской Республике.

См. пункт 4.3.1.4.

4.3.4.5. в Социалистической Федеративной Республике Югославии.

См. пункт 4.1.2.5.

4.3.4.6. в Республике Болгарии.

Материалы не получены.

4.3.4.7. в Румынии.

Анализ установления ледостава на нижнем участке Дуная - д-р П.Мита, Г.Андрееску.

Институт метеорологии и гидрологии.  
Бухарест, Румыния.

При составлении прогнозов о развитии льда главной целью является определение мер, предпринимаемых для предотвращения вредных последствий льда, и мер борьбы с ними.

Зима 1984-1985 гг. наглядно показала, какими могут быть эти последствия, причинившие национальному хозяйству значительный ущерб в связи с тем, что в результате содержащихся в ледяном покрове ресурсов речной ток был значительно исчерпан, а также в связи с наводнениями, вызванными осенними ледяными заторами, которые распространились на большие участки реки.

В случае Дуная к этим вредным последствиям добавляется и приостановление большого количества румынских и иностранных судов среди льда.

Таким образом, важность последствий, причиненных ледовыми явлениями оправдывает особый интерес, показанный в отношении развития льда и факторов, определяющих его на внутренних водных путях, а в частности, на Дунае.

В связи с внутренними водными путями часто упоминаются зависимости, разработанные экспертами В.Думитреску и М.Стан (2) для прогноза образования и разрушения льда. Знания о развитии льда на Дунае были углублены многими другими специалистами: Ц.Диакону (1), В.Думитреску (2), (3), М.Стан (2), М.Подани (6) и т.д.

Анализ данных, касающихся развития ледовых явлений на Нижнем Дунае в течение 50-летнего периода, показывает, что обеспеченность образования ледостава на этом участке составляет 44-56% (44,1% в Калараши, 56,0% в Чернавде и 50,0% в Тульче).

Более высокий уровень повторяемости и интенсивности ледовых явлений на Дунае ниже Джурджу, а особенно ниже Калараши, в первую очередь, объясняется атмосферной циркуляцией полярного происхождения, чаще появившейся на этом участке реки в течение зимнего периода, но является и результатом имеющихся в рукаве Дуная меньших расходов и меньшей скорости воды.

Это положение доказывает особую важность разработки некоторых моделей для составления прогнозов о льде, прежде всего, для нижнего участка Дуная.

В дальнейшем дается описание метода, основанного на данных, полученных от гидрометрических станций Чернавда и Тульча, в нем температура воздуха принимается как основной генетический фактор, а расход воды - как наиболее важный условный фактор.

Даты, когда были зарегистрированы температуры воды 3°C; 2,5°C; 2°C; 1,5°C и 1°C, служили ориентировочными моментами при составлении прогноза, прогнозируемые периоды состоялись с даты регистрации этих температур до даты установления ледостава (около 0°C).

Имея в виду, что уменьшение температуры воды происходит медленно, по мере того, как огромное количество воды подвергается термическому обмену, выделение этих температур в качестве ориентировочного момента при разработке прогноза образования ледостава можно считать правильным решением, с точки зрения, оптимального времени прогноза. Например, на участке Тульча для уменьшения температуры воды на  $1^{\circ}\text{C}$  необходимо, по крайней мере, 4-5-дневный период, когда среднесуточная температура воздуха составляет  $-9^{\circ}\text{C}; -10^{\circ}\text{C}$ .

Дату регистрации  $1^{\circ}\text{C}$  температуры воды можно считать исходным моментом для разработки краткосрочных прогнозов образования ледостава, а даты, когда зарегистрируются другие величины, такие как  $2^{\circ}\text{C}$  или  $3^{\circ}\text{C}$ , могут служить ориентировочным моментом для разработки прогнозов на более длительный срок.

В случае створов Чернавода и Тульча были анализированы колебания температуры воды, температуры воздуха, а также развития расходов воды в течение периода от момента наблюдения температуры воды  $3^{\circ}\text{C}; 2,5^{\circ}\text{C}; 2^{\circ}\text{C}$  и  $1^{\circ}\text{C}$  до момента образования ледостава. В результате анализа была установлена зависимость:

$$N = f(\bar{t}^-, \bar{Q}, \tau),$$

где  $\tau = 3^{\circ}\text{C}; 2,5^{\circ}\text{C}; 1,5^{\circ}\text{C}; 0,5^{\circ}\text{C}$  и использовались условные обозначения:

$N$  = количество дней в рассматриваемом периоде;

$\bar{t}^-$  = среднесуточная отрицательная температура в данном периоде;

$\bar{Q}$  = среднесуточный расход воды;

$\tau$  = температура воды, при которой был составлен прогноз (температура прогноза).

Имея в виду, что не было возможности проверить надежность физических гипотез, касающихся механизма образования ледостава, попробовали установить эмпирические корреляции между имеющимися рядами данных.

Длительность периода колебания расходов воды ( $Q$ ), в течение которого осуществилось измерение температуры воды ( $t_{\text{вода}}$ ) и воздуха ( $t_{\text{воздух}}$ ), то есть периода, предшествующего замерзанию ( $N$ ), а с другой стороны - небольшое количество корреляционных величин и отсутствие предельных величин относительно колебания величин  $t$  и  $N$  представили основные трудности при установлении зависимости прогноза.

Таким образом, после установления удовлетворительной зависимости для прогноза приступили к комплексному корреляционному анализу, который был проведен в нескольких этапах с использованием всех информации, имеющих относительно образования ледостава, а также условий этого процесса. Шесть этапов анализа, представляемые ниже в п.п. а-ф, идентичным образом могут применяться в случае других участков Дуная, кроме тех двух (Тулча и Чернавода), для которых они были разработаны:

а) Были выбраны образцы величин ( $N_i, \bar{t}_i$ ), и каждый из них сочетался с величиной температуры прогноза  $\bar{t} = 3^{\circ}\text{C}; 2,5^{\circ}\text{C}; 2^{\circ}\text{C}; 1,5^{\circ}\text{C}; 1^{\circ}\text{C}; 0,5^{\circ}\text{C}$ .

б) Было предположено, что расходы, по которым проводились измерения  $t_i, N_i$ , представляют ненадежный фактор. Средний расход был рассчитан для каждого образца:

$$\bar{Q}_{\text{med}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i$$

где:  $n$  - представляет количество величины в образце.

с) Путем корреляции была установлена зависимость  $g(t)$  для каждого образца, т.е. для определенных значений параметра прогноза и среднего расхода  $\bar{Q}$ . Для определения этой зависимости рассматривалось следующее:

- форма эмпирической кривой при графическом изображении ( $N_i, t_i$ );

- предельные условия физического характера  $C_1$  и  $C_2$ , а именно:

$S_1$ : если среднесуточная температура  $\bar{t}^-$  приближается к 0, количество дней, предстоящих до замерзания, асимптотически приближается к бесконечной величине

$$\bar{t}^- \longrightarrow 0 \longrightarrow N \longrightarrow \infty$$

$S_2$ : конечная (среднесуточная) температура, при которой замерзание происходит почти мгновенно:

$$N = 0 \longrightarrow \bar{t}^- = \bar{t} ; \bar{t} \text{ конечное.}$$

Представились несколько зависимостей, в принципе, отвечающих форме эмпирической кривой. Единственная кривая, которая удовлетворительным образом соответствовала эмпирическим данным при корреляционном коэффициенте  $S > 0,700$  при фигурирующих в прогнозе 6-ти температурах ( $\tau = 3,0^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 2,5^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 2,0^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 1,5^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 1,0^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 0,5^\circ\text{C}$ )

была следующая экспоненциальная функция:

$$g(t) = A_0 \cdot e^{K\bar{t}^-} \quad (1)$$

где:  $A_0$  и  $K$  - коэффициенты, определенные графикой ниже-следующей корреляции:

$$\ln g(t) = \ln A_0 + K\bar{t}^-$$

где:  $g(\bar{t}^-)$  - представляет количество дней до появления ледостава ( $N$ );

$\bar{t}^-$  - представляет среднесуточную температуру воздуха (отрицательные величины).

Но в экспоненциальной функции (1) предельное условие  $S_2$  не учтено. Кроме того, в ней отсутствуют данные наблюдения относительно предельного колебания величин  $t$  и  $N$  при  $t = 0$ , то есть в той же зоне, в которой экспоненциальная функция (1) не учитывает предельное условие  $S_2$ . Этим объясняется, что, несмотря на несоблюдение

ограничений физического характера, существуют некоторые высокие корреляционные коэффициенты. После того приступили к обсуждению эмпирической информации, а также информации, полученной при предельных условиях, предлагая для этой цели функцию с двумя членами:

$$f(\bar{t}^-) = g(\bar{t}^-) + h(\bar{t}^-) \quad (2)$$

Таким образом, что:

(1)  $g(\bar{t}^-)$  отличается от  $f(\bar{t}^-)$  в пределах погрешностей измерения температуры там, где такие измерения имеются. Другими словами,  $g(\bar{t}^-)$  охватывает эмпирическую информацию.

(2)  $h(\bar{t}^-)$  отличается от  $f(\bar{t}^-)$  в пределах погрешностей измерений, проведенных в области температуры, где  $\bar{t}^-$  имеет величины, которые приближаются к 0, где не имеется измерения, но известно, что  $f(\bar{t}^-)$  асимптотически приближается к 0. Другими словами,  $h(\bar{t}^-)$  включает теоретическую информацию, полученную путем применения функции:

$$h(\bar{t}^-) = \frac{\beta_0}{\bar{t}^-} \quad (3)$$

где коэффициент  $\beta_0$  получается при условии, что функция  $f(\bar{t}^-) = g(\bar{t}^-) + h(\bar{t}^-)$  проходит вблизи последних пунктов  $(N_i, t_i)$  эмпирических диаграмм.

Из зависимостей (1), (2) и (3) вытекает, что

$$f(\bar{t}^-) = A_0 \cdot e^{K\bar{t}^-} + \frac{\beta_0}{\bar{t}^-} \quad (4)$$

d) Была предложена зависимость в следующем виде:

$$g(\bar{t}^-) \sim \sqrt{Q}$$

Применяя эту зависимость, связь (4) была представлена в следующем виде:

$$f(\bar{t}^-) = A \sqrt{\bar{Q}} \cdot e^{K\bar{t}^-} + \frac{\beta_0}{\bar{t}^-} \quad (5)$$

С помощью которой были составлены графики  $f(\bar{t}^-)$  для всего образца о средних ( $\bar{Q}$ ), максимальных ( $\bar{Q}$  макс.) и минимальных ( $\bar{Q}$  мин.) расходов воды. Разброс эмпирических пунктов в поле трех графиков является показателем степени адекватности формулы (5).

е) Был проведен ряд операций (а)-(д) для всех температур, фигурирующих в прогнозе  $\tau_i = 1, \dots, 6$ , и в результате их было получено 6 функций  $f_i(\bar{t}^-, \bar{Q})$ .

ф) С тем, чтобы установить функцию между параметрами  $\bar{t}^-$ ,  $\bar{Q}$  и  $\tau$ , приступили к определению корреляции между коэффициентами 6-ти функций  $f_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , получив в итоге следующую общую функцию:

$$f(\bar{t}^-, \bar{Q}, \tau)$$

Тип анализа, описанного в пунктах (а)-(ф), был применен в случае измерений, проведенных на гидрометрических станциях Тульча и Чернавода. Были установлены следующие функции:

$$N_T = f_T(\bar{t}^-, \bar{Q}, \tau) = (0,145\tau + 0,201) \cdot \sqrt{\bar{Q}} \cdot e^{-(0,013\tau + 0,075) \cdot \bar{t}^-} + \frac{3,76 - 0,850\tau}{\bar{t}^-} \quad (6)$$

$$N_C = f_C(\bar{t}^-, \bar{Q}, \tau) = (0,245\tau + 0,095) \cdot \sqrt{\bar{Q}} \cdot e^{-(0,0089\tau + 0,1062) \cdot \bar{t}^-} + \frac{3,76 - 0,850\tau}{\bar{t}^-} \quad (7)$$



На рисунках 1 и 2 представлены графики связей  $N=f(\bar{t}, \bar{Q})$  при  $\tau=3,0^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau=2,5^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau=2,0^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau=1,5^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau=1,0^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau=0,5^{\circ}\text{C}$ , полученных для гидрометрических станций Чернавода (1) и Тульча (2).

Анализ этих графиков показывает, в первую очередь, сходство кривых, соответствующих трем типам расходов:  $\bar{Q}_{\text{сред.}}$ ,  $\bar{Q}_{\text{макс.}}$ ,  $\bar{Q}_{\text{мин.}}$  - при среднесуточной температуре воздуха ниже  $-11^{\circ}\text{C}$  ( $t_{\text{воздух}}=-11^{\circ}, -15^{\circ}\text{C}$ ). Из этого можно сделать вывод, что влияние расходов уменьшается параллельно снижениям температуры воздуха. В условиях, где расход воды имеет роль ненадежного фактора, можно ожидать улучшения прогноза относительно интервала с наименьшими величинами температуры. Анализ доказал, что при некоторых отрицательных температурах воздуха в непосредственной близости от  $0^{\circ}$  ледостав не образуется даже, если эти температуры наблюдаются в течение длительного периода, а это означает, что для образования ледостава необходимо наличие определенной критической температуры.

При помощи связей (6) и (7) возможно определить критическую температуру, если  $N$  будет возможно максимальная величина, то есть максимальное количество дней в интервале, в течение которого можно ожидать образования ледостава, что составляет около 90 дней.

Полученная таким образом критическая температура находится между  $-0,1^{\circ}\text{C}$  и  $-0,2^{\circ}\text{C}$ , что соответствует и имеющимся данным.

Полученные высокие корреляционные коэффициенты доказывают правильность исходных данных и также приемлемость использованных функций.

Таким образом, можно считать, что эти зависимости могут быть полезными при составлении прогноза об образовании ледостава при наличии корректных прогнозов о развитии температуры воздуха и о расходах воды.

С тем, чтобы процесс разработки прогноза относительно даты образования ледостава был более оперативным, можно прямо использовать графические связи. Что касается

точности прогноза о дате образования ледостава, составленного с применением представленных связей, следует отметить, что их точность увеличивается по мере того, как сокращается рассматриваемый период, точно также, как в случае метеорологических прогнозов, которые будут тем более точными, чем короче будет период прогноза.

Таким образом можно обеспечить более высокий уровень точности в случае, если прогноз об образовании ледостава составляется на период прямо от момента регистрации определенных температур воды, а именно: от  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $1,5^{\circ}\text{C}$  до максимум  $2^{\circ}\text{C}$ . При рассмотрении графических связей прогноза видно, что с момента регистрации этих температур воды, например, на гидрометрической станции Тульча (рис.2), до момента образования ледостава остается всего 5-7 дней, и что за это время температура воздуха показывает постоянно отрицательные величины  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-6^{\circ}\text{C}$  и расход воды остается ниже  $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Связи показывают более высокую точность прогноза об образовании ледостава для всех категорий расходов в случае, если температура воздуха резко снижена, то есть ниже  $-10$ - $-12^{\circ}\text{C}$ .

### Литература

1. C.Diaconu - Possibilités de prévision des niveaux dans les conditions d'existence de la prise de fleuve sur le Danube.  
La III-ème Conference internationale portant sur les prévision hydrologiques des pays danubiens.  
Bucarest, 1965.
2. D.Dumitrescu - La prévision à longue échéance portant sur l'apparition de la prise de fleuve et du débâcle sur le Danube.  
La VII-ème Conference portant sur les prévision hydrologiques des pays danubiens Regensburg, 1975  
(Konferenzbericht Koblenz, 1977).

3. P.Mita - Possibilités de prévision de l'apparition et de l'évolution de la prise de fleuve sur le Danube inférieur. La V-ème Conférence portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens. Belgrad, 1969 (Zbornik dokladov, Belgrad, 1970).
4. P.Mita Méthode de prévision de l'apparition de la prise de fleuve influence par la température de l'air et le débit d'eau. La VII-ème Conférence portant sur les prévisions hydrologiques des pays danubiens. Regensburg, 1975 (Konferenzbericht Koblenz 1977).
5. P.Mita - On ice bridge phenomenon occurrence  
G.Andreescu on the Danube. XIII Conference of the Danube countries on hydrological forecasts. Belgrad, 1986.
6. M.Podani - Les glaçons sur le Danube durant l'intervalle janvier-mars 1985. Genèse, effets, mesures et conclusions. Hidrotehnica, vol.30 nr.7, 1985, Bucuresti.

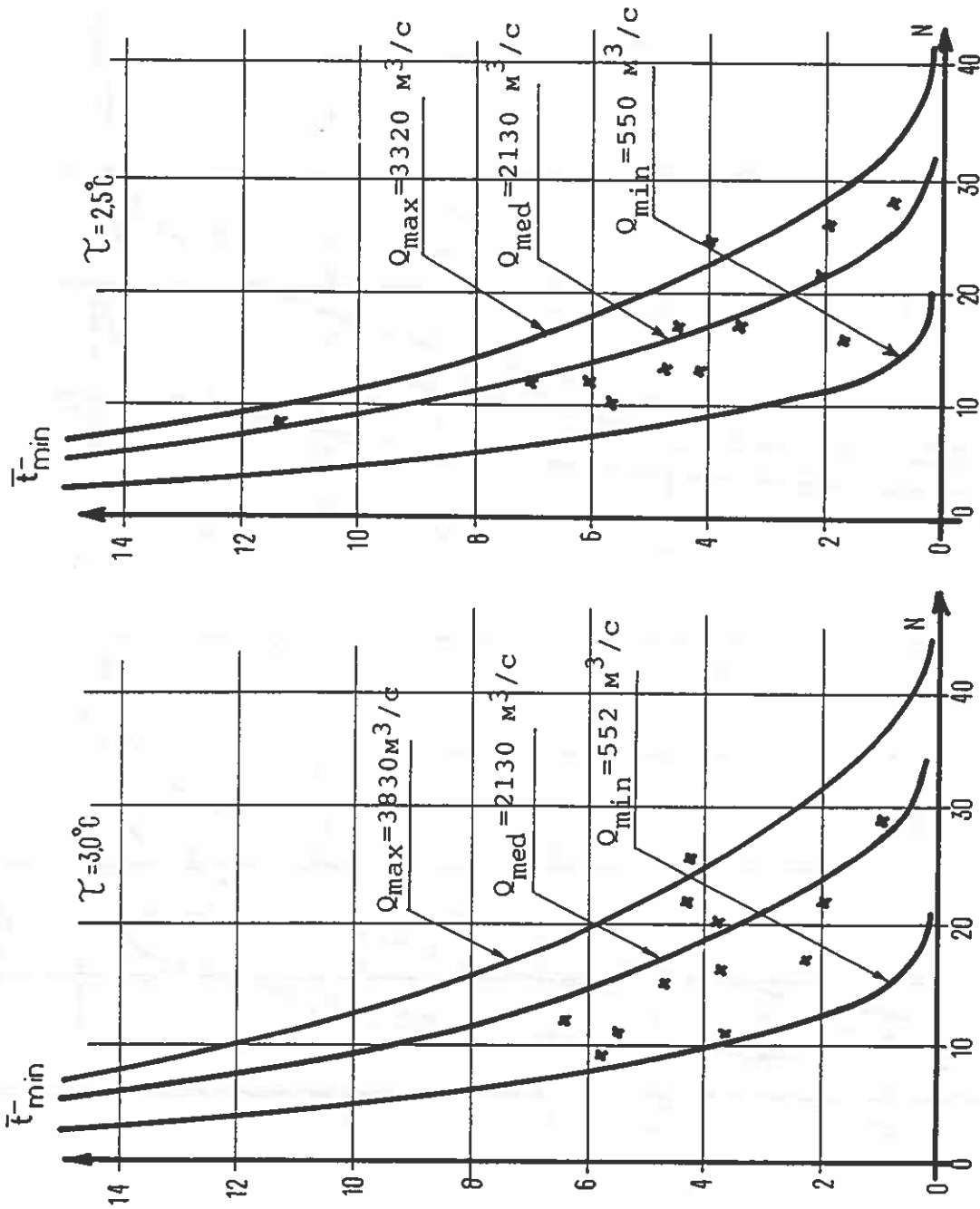


Рис. 1а. Зависимость  $N=f(\bar{t}_{\min})$  для гидротрической станции черновода.

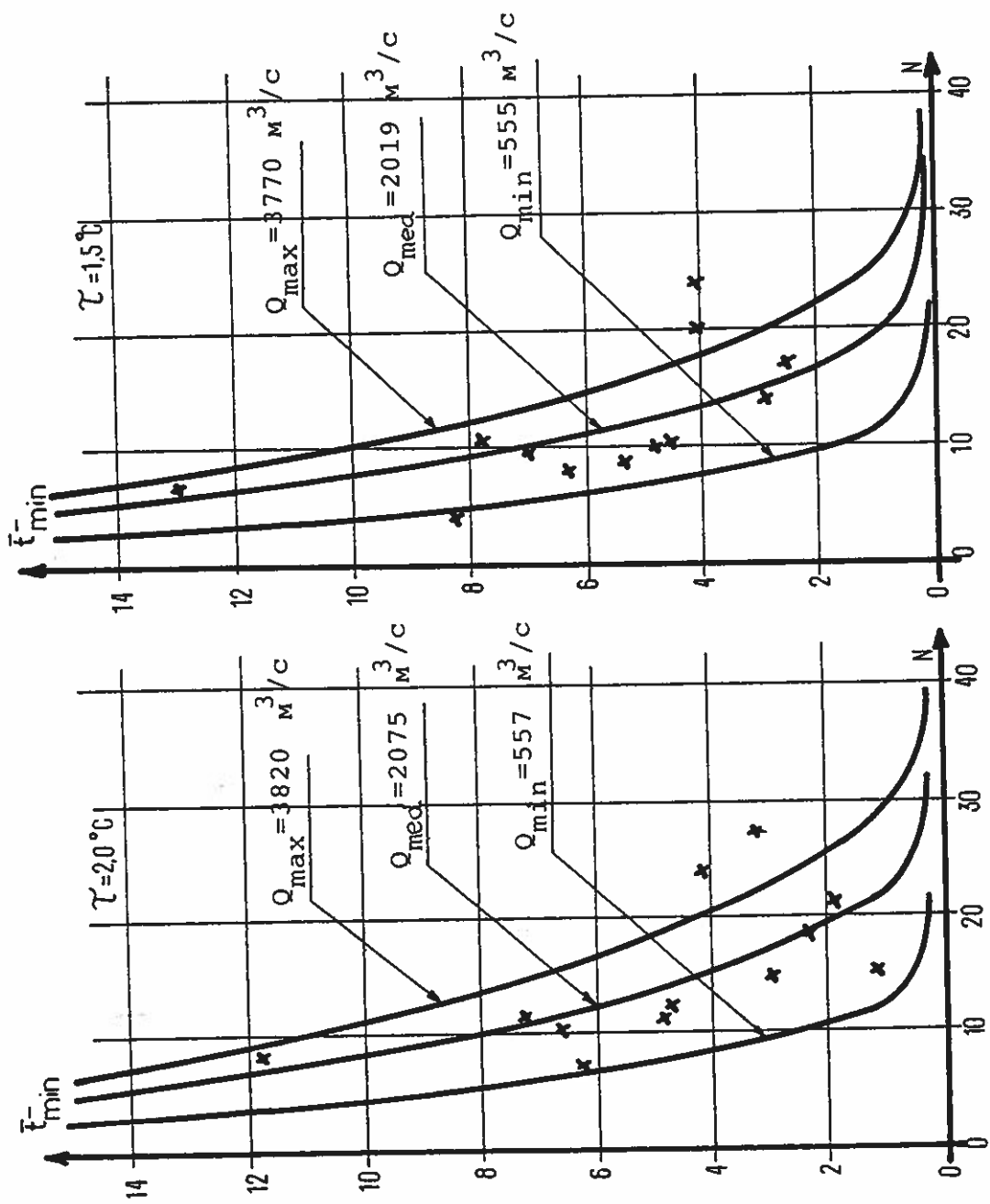
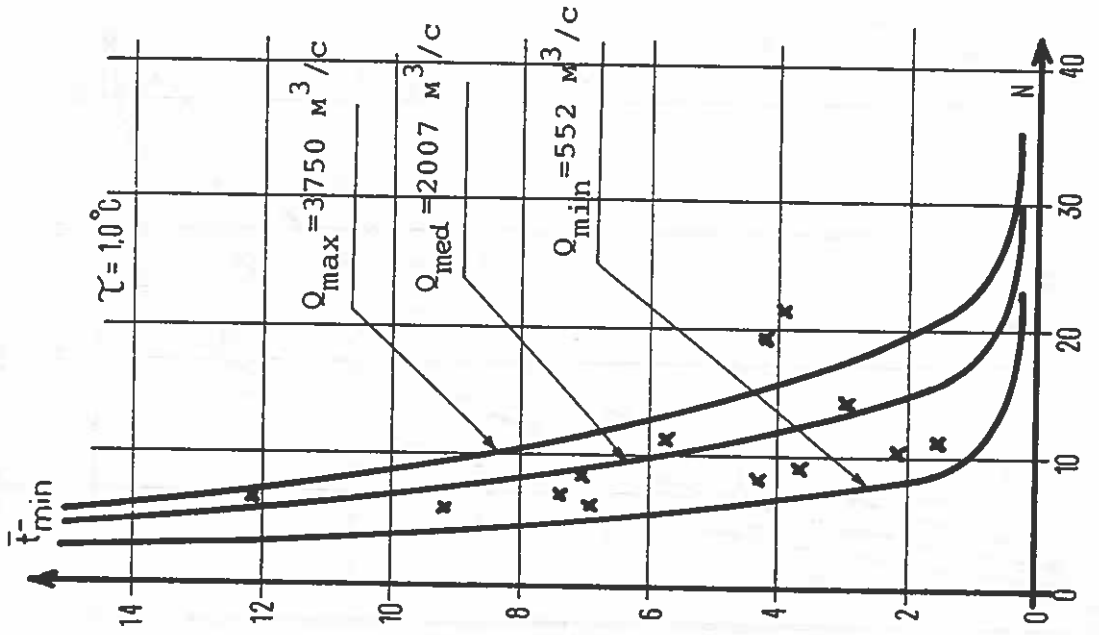
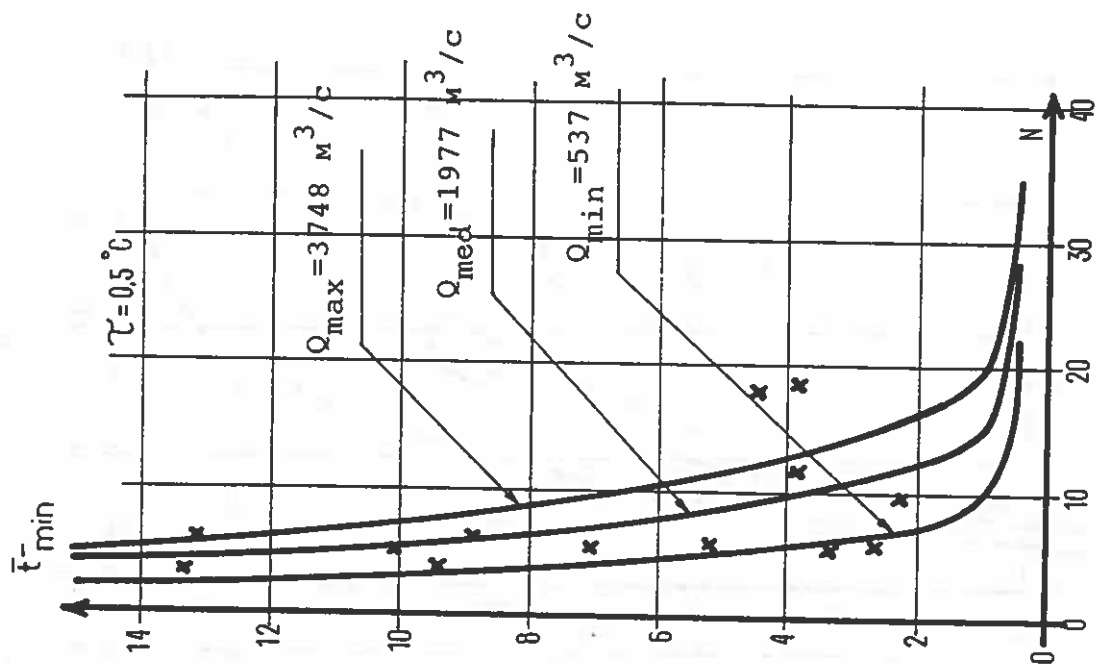


Рис. 1б. Зависимость  $N=f(t_{\min})$  для гидрометрической станции Чернавода.



Продолжение рис. 1б.

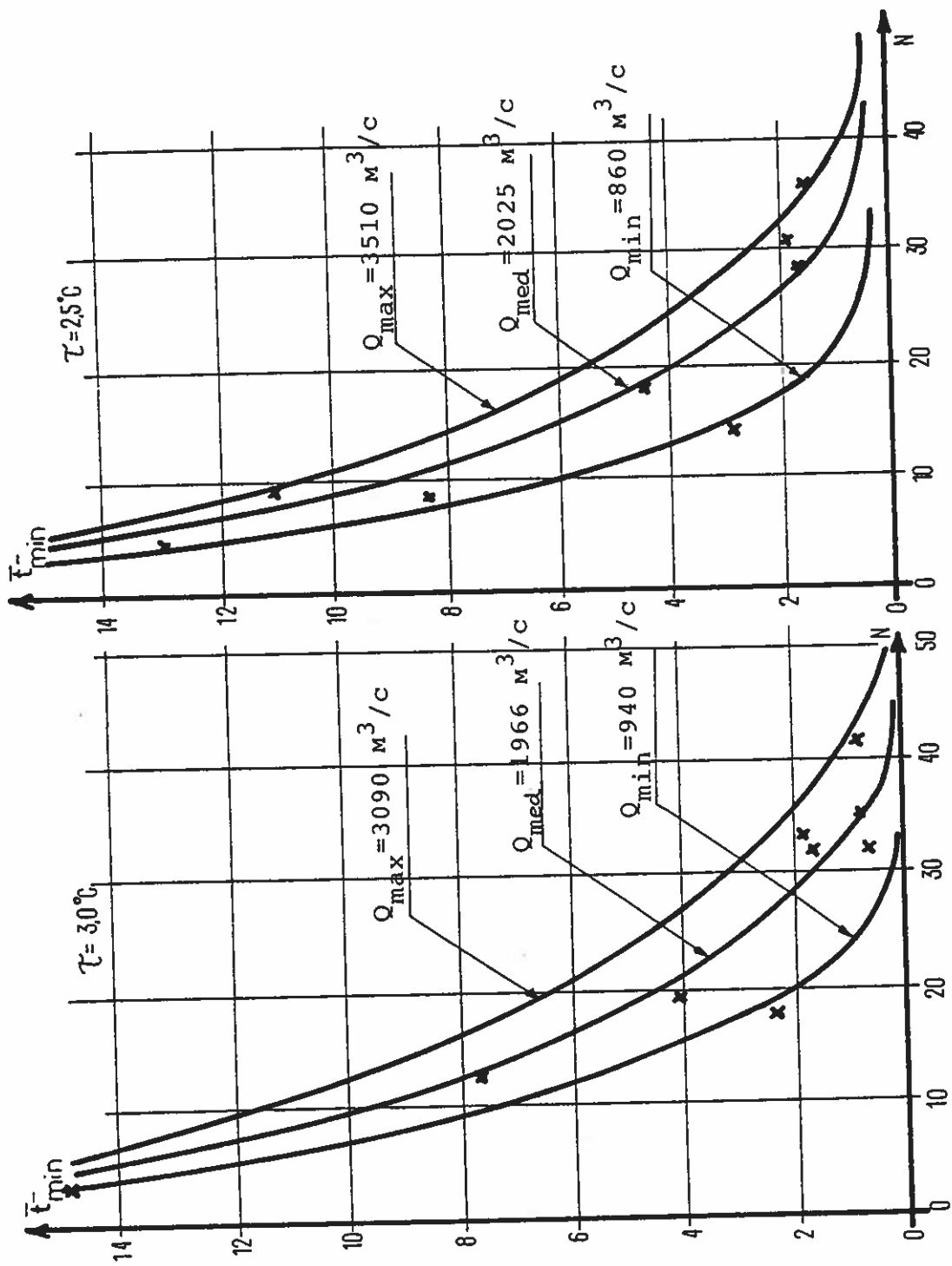


Рис. 2а. Зависимость  $N=f(t_{\min})$  для гидрометрической станции Тульча.

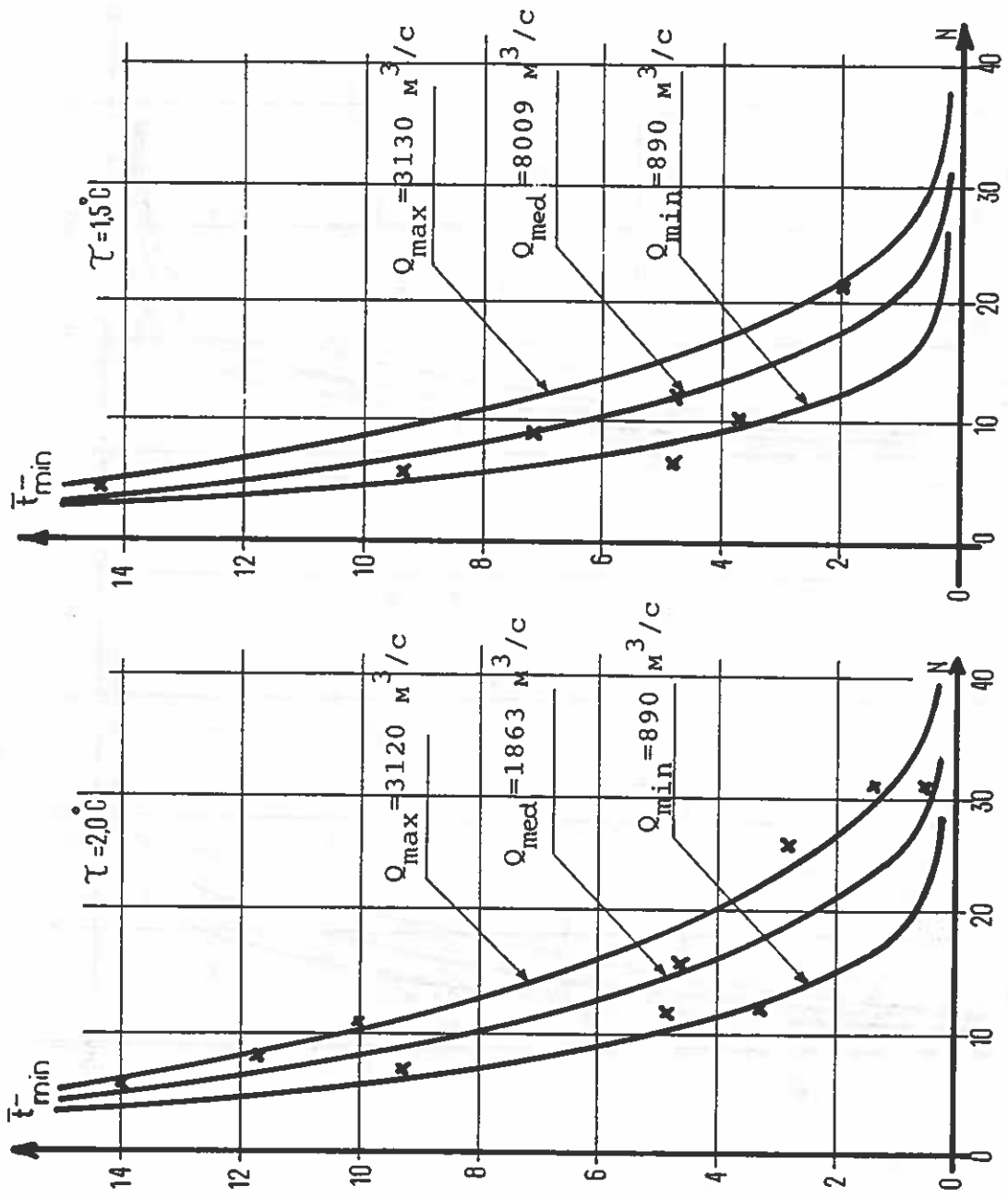


Рис. 2b. Зависимость  $N=f(t_{\min})$  для гидрометрической станции Тульча.



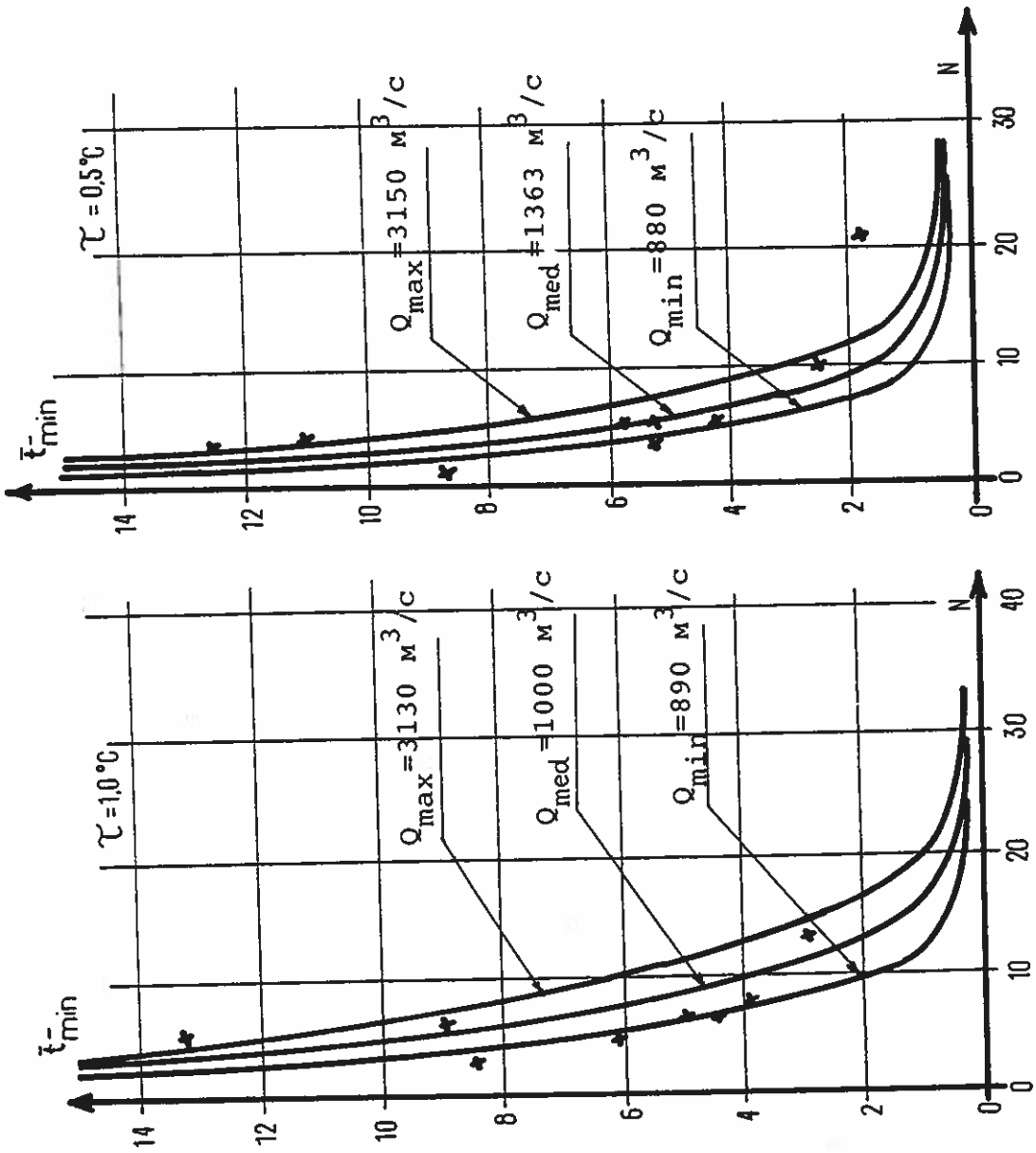


Рис. 2b. Продолжение.

4.3.4.8. в Союзе Советских Социалистических Рес- публик.

"Методы краткосрочного прогноза дат ус- тановления ледостава на Нижнем Дунае" - Щербак А.В.

Исследования по разработке методов краткосрочных прогнозов дат установления ледостава на советском участке Дуная выполнены в Украинском региональном научно-исследовательском институте Госкомгидромета СССР А.В. Щербаком в 1973-1974 гг. и в 1983-1984 гг. - для отдельных пунктов и участков Нижнего Дуная.

Сущность метода. Основы метода расчета начала ледостава на реках для целей краткосрочных прогнозов разработаны В.Д.Комаровым и Л.Г.Шуляковским (Гидрометцентр СССР). Сущность метода заключается в следующем.

Остановка льдин на участке не всегда дает начало ледяной перемычке. Для того, чтобы остановившиеся льдины смерзлись и образовалась ледяная перемычка, означающая начало ледостава, необходимо, чтобы смерзание происходило с необходимой интенсивностью, то есть, чтобы температура воздуха была в этот период достаточно низкой. Температура воздуха, выше которой не происходит устойчивое смерзание льдин и ледяные перемычки не образуются, названа критической ( $\theta_{кр}$ ).

Таким образом, для начала ледостава на участке необходимо выполнение двух условий:

- 1) должна произойти определенная для данных условий теплоотдача и
- 2) температура воздуха после выполнения первого условия должна быть не выше критической.

В качестве относительной характеристики теплоотдачи принимается сумма средних суточных отрицательных температур воздуха ( $\sum \theta_-$ ). При построении локальных зависимостей морфометрические и гидравлические условия,

влияющие на величины  $\sum \Theta_-$  и  $\Theta_{кр}$ , характеризуются величиной уровня воды. Расчет времени начала ледостава на участке производится по зависимостям

$$(\sum \Theta_-)_{мин} = f(N_{пр}), \quad (1)$$

$$\Theta_{кр} = \varrho (N_{пр}), \quad (2)$$

где  $(\sum \Theta_-)_{мин}$  - минимальная сумма средних суточных отрицательных температур воздуха, необходимая для начала ледостава;

$N_{пр}$  - предледоставный уровень воды. Значение последнего берется обычно в день появления плавающего льда.

Следует отметить, что введение в расчет переменной величины  $\Theta_{кр}$ , определяемой по (2), является особенно необходимым в районах с неустойчивым режимом отрицательных температур воздуха в осенне-зимний период.

На рис.1 представлены зависимости для определения значений суммы отрицательных температур воздуха, необходимой для установления неподвижного ледяного покрова на советском участке Дуная, и критической температуры воздуха по величине уровня воды на Дунае у г.Рени в день появления на участке плавающего льда.

Расчет сроков установления ледостава на рассматриваемом участке с использованием полученных зависимостей дает вполне удовлетворительные результаты: в 95% случаев проверочных прогнозов ошибка не превышает 1 день и в 100% случаев - допустимую погрешность, равную 2 дням. Аналогичные результаты получены и при использовании данной методики в оперативной практике Дунайской гидромет-обсерватории.

Несмотря на удовлетворительные результаты, полученные зависимости нельзя считать устойчивыми, поскольку они установлены на весьма ограниченном исходном материале.

Исходя из этого, была предпринята попытка выяснить возможность применения для расчета начала ледостава в низовьях Дуная расчетных зависимостей, общих для разных рек. Метод построения этих зависимостей разработан Л.Г. Шуляковским, при их построении использовались данные измерений и наблюдений на отдельных участках рек Волги, Оби, Камы, Белой.

В результате анализа процесса образования ледяных перемычек, действующих при этом сил и напряжений и их зависимости от метеорологических условий, морфометрических и гидравлических характеристик потока, Шуляковским выделены основные факторы, определяющие необходимые для начала ледостава величины суммарной теплоотдачи

$$\beta \sum \Theta_- = f(u, b, L, \rho_{\text{л}}, g) \quad (3)$$

и критической температуры воздуха

$$\Theta_{\text{кр}} = \varphi(u, b, \rho_{\text{л}}, \rho_{\text{в}}, g, \frac{\partial \sigma_{\text{в}}}{\partial \Theta}) \quad (4)$$

Здесь  $\beta \sum \Theta_-$  — приближенная характеристика суммарной теплоотдачи,

$\beta$  — коэффициент, имеющий размерность  $QL^{-2}T^{-1}C^{-1}$  при размерности  $\sum \Theta_-$  — равной  $ТС$ ;

$u$  — средняя скорость течения в м/с,

$b$  — ширина реки в м,

$L$  — удельная теплота ледообразования,

$\rho_{\text{л}}$  и  $\rho_{\text{в}}$  — плотность льда и воды,

$\frac{\partial \sigma_{\text{в}}}{\partial \Theta}$  — изменение прочности льда с изменением температуры воздуха,

$g$  — ускорение силы тяжести.

Анализ размерностей этих величин показал, что зависимости (3) и (4) могут быть представлены в виде следующих связей между безразмерными комбинациями этих величин:

$$\frac{\beta \sum \Theta_-}{L \varphi_l \nu} = f\left(\frac{u^2}{g \nu}\right), \quad (5)$$

$$\frac{\Theta_{кр} \frac{\partial \bar{b}_s}{\partial \Theta}}{\nu g_s} = \varphi\left(\frac{u^2}{g \nu}\right). \quad (6)$$

При вычислении указанных комбинаций принимаются следующие измерения и величины:  $\beta = 20$  кал/см<sup>2</sup> сут град;  $L = 80$  кал/г,  $\varphi_l = 0,913$  г/см<sup>3</sup> и  $\frac{\partial \bar{b}_s}{\partial \Theta} = 1$  кг/см<sup>2</sup> град.

Из аналитических выражений линий связи зависимостей (5) и (6) получены формулы для расчета суммы среднесуточных отрицательных температур воздуха, необходимой для начала ледостава

$$\sum \Theta_- = -10,3u^{1,22} \nu^{0,39} \quad (7)$$

и критической температуры воздуха

$$\Theta_{кр} = -0,65u \nu^{0,5}. \quad (8)$$

При наличии на участке нескольких гидрометрических створов величины скорости течения и ширины реки рекомендуется определять по створу с наименьшими величинами по графикам связи  $u=f(H)$  и  $\nu=\varphi(H)$  для периода, свободного ото льда.

Нанесенные на графики значения выражений (5) и (6), определенные по данным измерений на советском участке Дуная, согласуются с полем точек, полученных для других

равнинных рек Дуная, согласуются с полем точек, полученных для других равнинных рек СССР. Это дает основание рекомендовать формулы (7) и (8) для расчета начала ледостава на советском участке Дуная. При этом в 90% случаев проверочных прогнозов ошибка не превышает 1 день и в 100% случаев - допустимую погрешность, равную 2 дням.

Схема составления прогноза. Краткосрочный прогноз даты начала установления ледостава на советском участке Дуная составляется в день появления льда по данным одного из четырех на участке водомерных постов (Рени, Измали, Килия, Вилково) двумя способами:

1) по локальным зависимостям, представленным на рис. 1. Минимальная сумма отрицательных средних суточных температур воздуха  $(\sum \theta_-)_{\text{мин}}$ , необходимая для установления ледостава, и критическая температура воздуха  $\theta_{\text{кр}}$  снимаются с указанного рисунка в зависимости от уровня воды  $H$  по водпосту Рени в день появления льда на участке.

2) по общим для разных рек зависимостям - формулы (7) и (8). Необходимые для определения суммы отрицательных температур воздуха и критической температуры воздуха скорости течения  $u$  и ширины реки  $l$  снимаются с соответствующих графиков в зависимости от уровня воды на Дунае у Рени в день появления льда на участке. Даты накопления  $(\sum \theta_-)_{\text{мин}}$  и  $\theta_{\text{кр}}$ , определенных по рис.1 и вычисленных по формулам (7) и (8), устанавливаются по прогнозу температуры воздуха.

Ожидаемое начало ледостава принимается в дату наступления критической температуры воздуха после накопления необходимой для установления ледостава  $(\sum \theta_-)_{\text{мин}}$ . Заблаговременность прогноза 3-5 суток; допустимая погрешность равна 2 дням.

Для других участков Нижнего Дуная при составлении краткосрочных прогнозов начала ледостава могут быть использованы зависимости для определения  $(\sum \theta_-)_{\text{мин}}$  и  $\theta_{\text{кр}}$ , аналогичные зависимостям, приведенным на рис.1, построенные по данным наблюдений того или иного участка реки.

В качестве прогностической зависимости для установления дат начала ледостава на участке Свиштов-Силистра может быть также использована связь между датами ледостава на этом участке и в Килийском рукаве Дуная у г.Измаил, представленная на рис.2. Ожидаемое начало ледостава на участке Свиштов-Силистра определяется при этом по фактической дате установления ледостава у Измаила и величине уровня воды в эту дату на Дунае у г.Рени. Средняя заблаговременность прогноза 6 суток, допустимая погрешность - 3 дня.

Результаты исследований по разработке метода краткосрочного прогноза начала ледостава на Нижнем Дунае опубликованы в Трудах УкрНИГМИ, 1975, вып. 135, с. 117-123.

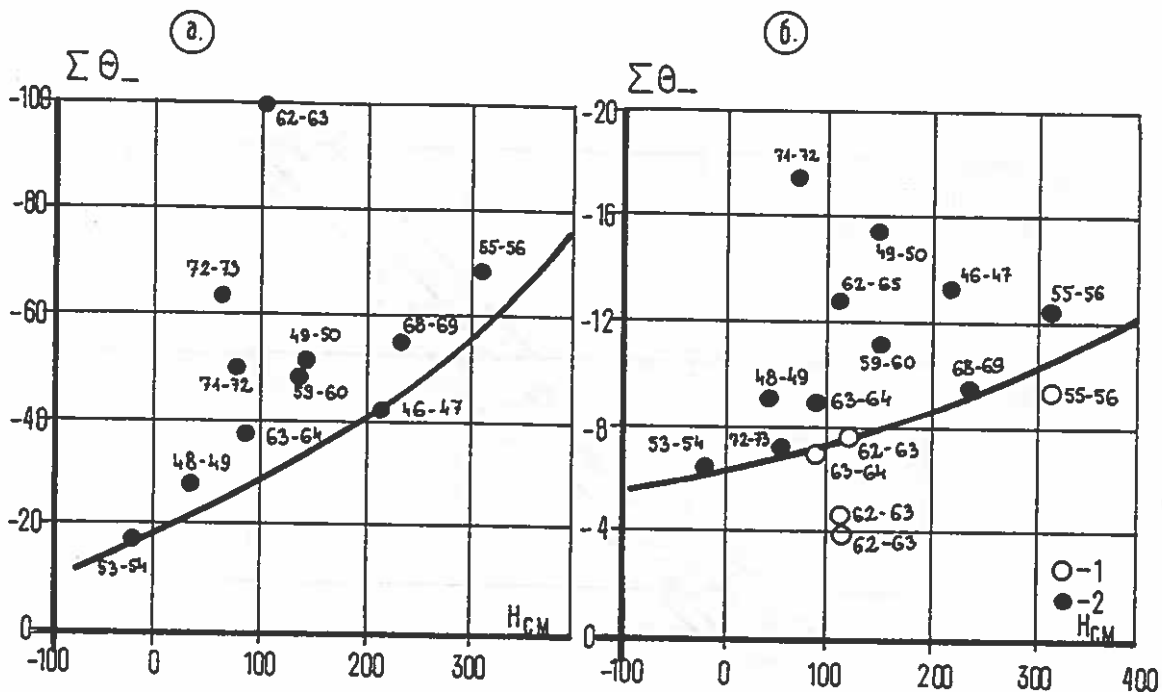


Рис. 1. Зависимость минимальной суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха ( $\Sigma \Theta_{-}$ )<sub>мин</sub>, необходимой для установления ледостава на участке Рени-Вилково (а) и критической температуры воздуха  $\Theta_{кр}$  (б) от уровня воды на Дунае у г.Рени в день появления плавучего льда.

- 1 - температура воздуха после накопления ( $\Sigma \Theta_{-}$ )<sub>мин</sub> недостаточна для установления ледостава,
- 2 - температура воздуха после накопления ( $\Sigma \Theta_{-}$ )<sub>мин</sub> достаточна для установления ледостава.



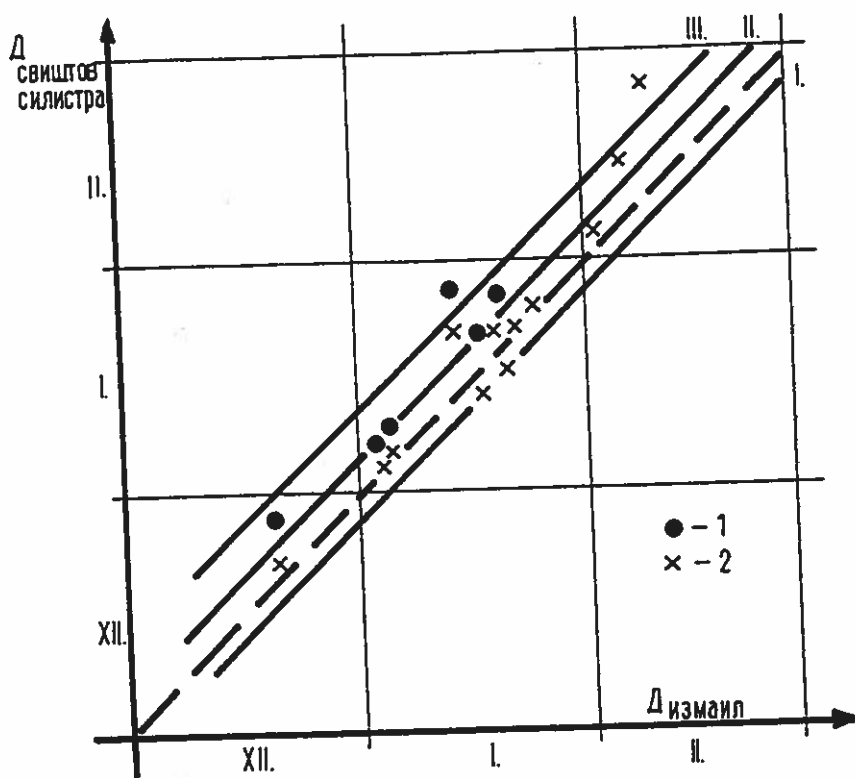


Рис. 2. Связь между датами установления ледостава на Дунае у Свиштова, Силистры и Измаила с учетом величины уровня воды при установлении ледостава у Измаила.

1 - Свиштов, 2 - Силистра.

I. -  $H = 300$  см, II. -  $H = 100-300$  см,

III. -  $H = 100$  см.