

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Н.В. Викторова

**ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ:  
МОДЕЛИ И ГИС-ТЕХНОЛОГИИ  
ПРИ КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ  
ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОСТИ**

Учебное пособие

Направление подготовки – Гидрометеорология  
Профиль подготовки – Прикладная гидрология



Санкт-Петербург  
2013

**УДК 556.06 (076)**

**ББК 26.22**

Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Гидрологические прогнозы: модели и ГИС-технологии при краткосрочном прогнозировании изменения водности. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2013. – 30 с.

**ISBN 978-5-86813-345-9**

*Рецензент:* д-р физ.-мат. наук С.А. Кондратьев (зам. директора Института озераведения РАН).

Особенностью данного учебного пособия является использование для прогнозирования современных математических моделей формирования стока, Интернет-ресурсов, оперативной гидрологической информации и ГИС-технологий. Настоящее пособие предназначено для проведения дежурств студентами-гидрологами вузов в учебном бюро гидрологических прогнозов.

Kovalenko V.V., Gaidukova E.V., Victorova N.V. Hydrological Forecasts: models and GIS-technology in the short-term forecasting changes in water content. Tutorial. – St. Petersburg, RSHU Publishers, 2013. – 30 pp.

A feature of this tutorial is to use advanced mathematical models predict runoff, Internet-resources, operational hydrological information and GIS-technology. These handbook are intended for duty hydrologists university students in the educational bureau of hydrological forecasts.

**ISBN 978-5-86813-345-9**

- © Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В., 2013
- © Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Многие отрасли национального хозяйства, деятельность которых тесно связана с использованием водных ресурсов, нуждаются в различного рода гидрологических прогнозах. Надежный прогноз позволяет оптимизировать хозяйственную деятельность с учетом потребностей производства и социальной направленности нашего государства.

В настоящее время под прогнозированием, в общем смысле этого слова, понимается специальное научное исследование, предметом которого являются перспективы развития различных явлений. При этом прогноз определяется как вероятностное, научно обоснованное суждение о возможных состояниях того или иного объекта в будущем и (или) об альтернативных путях и сроках их осуществления. В более узком смысле метод прогнозирования представляет форму теоретического или практического подхода, направленного на получение конкретного результата в процессе разработки прогноза.

В данном пособии рассматривается методика динамического фонового прогноза изменения водности для территории Северо-Западного региона. Методика реализована в рамках ГИС-технологий (серии прогностических карт) и опирается только на сетевые гидрометеорологические наблюдения и Интернет-ресурсы, находящиеся в открытом доступе. В данных указаниях не рассматриваются вопросы стандартных методик прогнозирования, по которым имеются соответствующие нормативные документы.

### **Технология проведения дежурства в учебном бюро гидрологических прогнозов**

#### **1. Схема Северо-Западного региона и местоположение гидропостов**

Северо-Западный регион включает бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер. В табл. 1 перечислены посты наблюдений за гидрологическими характеристиками; эти посты имеют зональные площади водосбора  $F$  (обычно более  $1500 \text{ км}^2$ ), продолжительные многолетние ряды наблюдений и по ним предоставляется оперативная информация. Выполнение условий по площадям и продолжительности наблюдений необходимы для перехода от оперативно полученных уровней воды  $H$  к расходам воды  $Q$  по зависимостям  $Q=f(H)$ .

На рис. 1 представлена схема расположения использованных гидрологических постов.

Таблица 1

Посты наблюдений за расходом воды в Северо-Западной регионе (бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладжского озер)

Код станции	Река – Пост	F, км <sup>2</sup>	Идентификационный номер
14	Нева – д. Новосаратовка	281000	72818
18	Тосно – ст. Тосно	1300	72043
38	Асилан-йоки – свх. Застава	1370	72086
66	Паша – д. Поречье	1110	72154
67	Паша – ниже д. Дуброво	3910	72155
68	Паша – с. Часовенское	5710	72156
73	Капша – д. Еремина Гора	1560	72162
78	Шуя – д. Бесовец	9560	48021
83	Сяньга – д. Чаралахта	1610	48029
100	Пяльма – д. Пяльма	908	48071
102	Водла – д. Харловская	12000	48079
121	Сясь – д. Яхново	6230	72169
123	Воложба – д. Воложба	1330	72173
129	Тихвинка – д. Горелуха	2070	72188
145	Пчевжа – д. Белая	1690	72239
152	Мста – с. Березовский Рядок	5180	72259
153	Мста – пос. Потерпелицы	13200	72269
154	Мста – с. Бор	16900	72276
155	Мста – д. Девкино	22500	72281
159	Шлина – д. Годыши	1620	72292
161	Березайка – д. Устье	3030	72305
170	Уверь – д. Меглецы	1750	72327
196	Холово – д. Горбуново	1500	72409
199	Пола – д. Новый Новосел	1900	72420
200	Пола – д. Налочи	6740	72423
207	Ловать – г. Великие Луки	3270	72454
208	Ловать – д. Сельцо	8230	72458
209	Ловать – г. Холм	14700	72459
212	Насва – д. Гороховье	1080	72466
214	Кунья – д. Уварово	2480	72477
215	Кунья – г. Холм	5140	72478
220	Полисть – д. Подтополье	2150	72492
225	Шелонь – г. Порхов	2950	72508
226	Шелонь – д. Заполье	6820	72510
232	Мшага – д. Раглицы	1250	72523
240	Луга – д. Луга	2330	72566
241	Луга – ст. Толмачево	6350	72569
242	Луга – г. Кингисепп	12800	72577
246	Оредеж – д. Моровино	3060	72589
254	Саба – д. Райково	1280	72609

Продолжение табл. 1

258	Плюсса – с. Плюсса	1440	72623
259	Плюсса – д. Брод	5090	72625
270	Великая – д. Мельница	2960	72652
271	Великая – г. Опочка	3500	72654
272	Великая – д. Селихново	6350	72656
273	Великая – д. Гуйтово	13400	72660
274	Великая – д. Пятоново	20000	72661
275	Великая – г. Псков	24000	72665
278	Исса – д. Визги	1410	72674
284	Сорочь – д. Осинкино	3170	72682
289	Утрья – д. Большая Губа	2970	72696
292	Лжа – д. Ваньково	1560	72699
298	Череха – д. Сорокина	2330	



Рис. 1. Схема расположения указанных в табл. 1 гидрологических постов Северо-Западного региона (номер у поста – код станции).

## 2. Получение данных оперативных наблюдений

Из телеграмм получаем информацию об уровнях воды, суточных осадках, и температуры воздуха. Раскодирование телеграмм производится по коду КН-15. Приведем основные принципы дешифрирования телеграмм.

Код КН-15 состоит из разделов, каждый из которых предназначен для кодирования определенного вида данных. Раздел состоит из пятизначных кодовых групп. Каждая группа в разделе имеет свой постоянный отличительный номер, который определяет содержание группы в данном разделе. В табл. 2 представлена схема кода КН-15 для разделов 0 и 1, которых достаточно для раскодирования телеграмм в наших целях.

Таблица 2

Схема кода КН-15

Номер раздела	Состав раздела				Краткое содержание
0	$M_i M_j M_k M_l$	$BBi_n i_n i_n$	$YYGGn$		Буквенный опознаватель кода, индекс гидрологического поста, дата и срок наблюдений
1	$1NNNN$ $\left\{ \begin{array}{l} 5EEi_E i_E \text{ или} \\ 5EEEE \end{array} \right\}$ $7DDDS$	$2N_i N_i N_i K$  $8kQQQ$	$3N_{20} N_{20} N_{20} N_{20}$ $\left\{ \begin{array}{l} 6CCCc_i c \text{ или} \\ 6CCCC \end{array} \right\}$ $0R_{24} R_{24} R_{24} d_c$	4ttTT	Данные ежедневных стандартных наблюдений на гидрологическом посту за текущие сутки; уровень воды и характеристики его изменения, температура воды и воздуха, характеристики ледовых явлений или состояния реки, толщина льда и высота снега на льду, расход воды, количество осадков

Пример раскодирования.

Вид телеграммы: 72169 10081 10438 20089 30400 40204 54344 00040

Вид заполненной таблицы в журнале ГП-25:

Апрель месяц 2011 год

Река, озеро, водохранилище	р. Сясь
Водпост	д. Яхново

Число	Уровень, см	Разность уровней, см	Осадки, мм	Температура <u>воды</u> воздуха	Ледовая обстановка	Расход воды, м <sup>3</sup> /сек
1						
....						
9	349					
10	438	89	4	$\frac{0,2}{4,0}$	Подвижка льда, разводья	

### 3. Используемые математические модели формирования расходов воды

Для прогноза используются модели склонового стока:

– *первого порядка*:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{\dot{X}}{\tau}, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход (модуль, слой) стока;  $\dot{X}$  – интенсивность осадков;  $k$  – коэффициент стока;  $\tau$  – время релаксации речного бассейна.

– *второго порядка*:

$$\tau_2 \frac{d^2Q}{dt^2} + \left( \frac{\tau_2}{k\tau_1} + 1 \right) \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{k\tau_1}Q = \frac{1}{\tau_1} \dot{X}, \quad (2)$$

где  $\tau_1$  – время добегания поверхностного стока;  $\tau_2$  – время добегания подземного стока.

При прогнозировании водности в период снеготаяния внешнее воздействие (интенсивность осадков  $\dot{X}$ ) рассматривается как произведение коэффициента снеготаяния  $a$  (который оптимизируется на фактическом материале) на сумму температур воздуха  $\sum T$  °С.

#### 4. Конечно-разностная аппроксимация используемых моделей

Для численной реализации моделей используются аппроксимации:

а) модель склонового стока первого порядка:

$$\frac{Q_{i+1} + Q_i}{\Delta t} = -\frac{1}{k\tau} Q_i + \frac{\dot{X}_i}{\tau}; \quad (3)$$

б) модель склонового стока второго порядка:

$$\tau_2 \frac{Q_{i+1} - 2Q_i + Q_{i-1}}{(\Delta t)^2} + \left(\frac{\tau_2}{k\tau_1} + 1\right) \left(\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t}\right) + \frac{1}{k\tau_1} Q_i = \frac{\dot{X}_i}{\tau_1}, \quad (4)$$

где  $i$  – моменты времени.

#### 5. Технология прогноза склонового стока

Прогноз состоит из трех этапов (а, б, в).

**а) Оптимизация параметров** модели на фактическом материале за предыдущие 15 суток (рис. 2) по критериям  $S/\sigma_{\Delta}$  и относительному числу оправдавшихся поверочных прогнозов ( $P\%$ ).

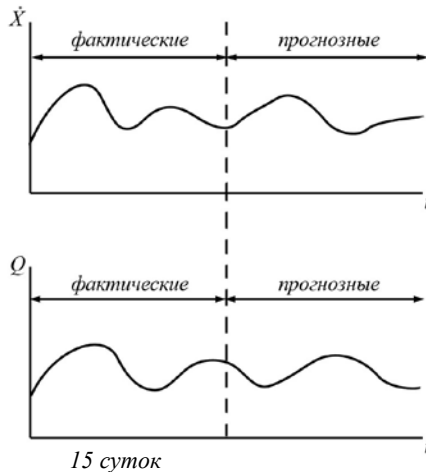


Рис. 2. К пояснению оптимизации параметров.



За оптимальные значения параметров (коэффициент стока, время добегания поверхностного стока, коэффициент снеготаяния, время добегания подземного стока) принимаются те значения, с которыми при поверочном прогнозе получены минимальное соотношение  $S/\sigma_{\Delta}$  и максимальная величина  $P$ .

Методика оптимизации заключается в следующем.

1. Рассчитывается допустимая погрешность:

$$\delta_{\text{доп}} = \pm 0,674 \sigma_{\Delta}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\Delta}$  – среднее квадратическое отклонение изменения прогнозируемой величины за период заблаговременности прогноза от среднего значения этого изменения:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}, \quad (6)$$

где  $\Delta_i$  – изменение прогнозируемой величины за период заблаговременности прогноза;  $\bar{\Delta}$  – среднее значение этих изменений;  $n$  – число изменений.

Заблаговременность краткосрочных прогнозов времени наступления гидрологических явлений (водных и ледовых) определяется периодом от даты выпуска прогноза до указанной в прогнозе даты. В нашем случае имеет место **процесс прогнозирования** на интервале 8 суток с дискретностью  $\Delta t = 1$  сутки, однако оптимизация параметров производится по пятнадцати предшествующим фактическим осадкам и стоку.

2. Оценивается оправдываемость отдельного прогноза. Прогноз считается оправдавшимся, если абсолютная величина его погрешности меньше или равна допустимой.

3. Оценивается эффективность методики. Мерой точности методики прогнозирования является средняя квадратическая погрешность проверочных прогнозов, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n-m}}, \quad (7)$$

где  $y_i$  и  $y'_i$  – соответственно фактическое и предсказанное значения;  $n$  – число членов ряда;  $m$  – число степеней свободы, равное числу постоянных коэффициентов в прогностическом уравнении.

За критерий применимости и качества методики принимается отношение  $S/\sigma_{\Delta}$ .

Погрешности определения  $S$  и  $\sigma$  зависят и от числа членов ряда  $n$ , поэтому учитываются следующие условия применимости методик прогнозирования: при  $n \leq 15$   $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,70$ ; при  $15 < n < 25$   $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,75$ ; при  $n \geq 25$   $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ .

4. Определяется обеспеченность методики:

$$P = \frac{n'}{n} 100, \quad (8)$$

где  $n'$  – число оправдавшихся прогнозов.

5. Выбираются оптимальные значения параметров, при которых получены минимальное соотношение  $S/\sigma_{\Delta}$  и максимальная величина  $P$ .

#### **б) Получение прогноза метеоэлементов из Интернет-ресурса.**

Для того чтобы прогнозировать по моделям (1), (2) значения расходов воды, мало знать оптимизированные значения параметров по предшествующим 15 суткам, необходимо еще знание прогнозного хода осадков. Информация о прогнозных осадках берется с сайта <http://www.westwind.ch>.

Требования, предъявляемые к информации об осадках на сайтах Интернета, следующие: возможность получения количества осадков в точке на местности и с определенной широтой и долготой; возможность получения динамики полей осадков (в мм слоя); достоверность прогнозных значений осадков. Всем перечисленным требованиям удовлетворяет сайт [westwind.ch](http://www.westwind.ch).

Рассмотрим технологию получения данных об осадках.

1. На рис. 3 показана главная страница сайта. На этой же странице можно ознакомиться с алгоритмами, по которым рассчитываются прогнозные значения метеорологических показателей.



Рис. 3. Главная страница сайта westwind.ch.

2. На странице, показанной на рис. 4, можно выбрать любую точку земного шара путем наведения курсора на карту. Имеется возможность получения прогнозных характеристик через 2, 3 и 8 суток.

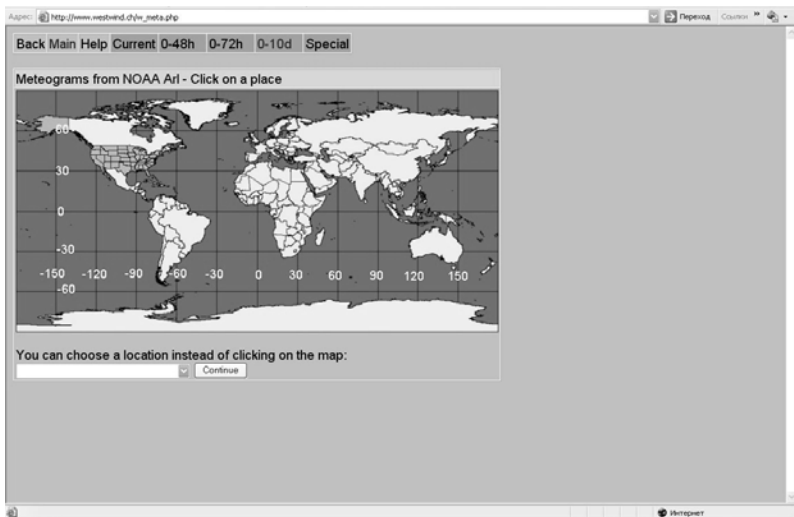


Рис. 4. Страница с возможностью выбора любой точки на земле для получения прогнозных метеохарактеристик.

3. На рис. 5 показана страница для ввода широты и долготы интересующей точки, а также различных предварительных параметров прогноза.

Address http://www.ready.noaa.gov/ready/forecast.html

**ARL** Air Resources Laboratory **READY** NOAA

HOME | HYSPLIT | DISPERSION MODELING | METEOROLOGY | EMERGENCY ASSISTANCE | STATUS | CONTACTS

### CURRENT METEOROLOGY (WORLD)

#### Forecast Model Graphics

Choose a forecast location by entering an 4 character ICAO station identifier or a 6 digit WMO index number or a latitude/longitude pair and then click the Continue button, or by clicking on the location in the map. You will be taken to the model products section.

ICAO or WMO ID:  Search for Code OR  Latitude (degrees)  
 Or choose a city -->  Longitude (West < 0)

Convert Deg/Min/Sec into Decimal Degree

OR click a location on the map below.

North American Map      United States      Global Map

#### Text & Misc Products

Text Products	Forecasts <input type="button" value="Next&gt;&gt;"/>	Decoded Surface METAR Observations <input type="button" value="Next&gt;&gt;"/>
	State Weather	UV Radiation Forecasts
Other Graphical Products	Forecast Model Animations <input type="button" value="Go"/>	
Other NOAA Products	First, Pick Category --> <input type="text"/> then, Pick Item --> <input type="text"/> <small>This menu requires that Javascript be enabled in your browser. You may need to reload the page if the list is blank and you have Javascript enabled.</small>	

**DISCLAIMER** Weather forecasts and other weather related information found on this site should not be substituted for official National Weather Service (NWS) forecast and warning information issued by local NWS offices. Meteorological information provided here is primarily to support the HYSPLIT transport and dispersion model. Data availability is not guaranteed; we are not a 24/7 operation.

Questions/Comments?

Рис. 5. Страница с окнами для ввода широты и долготы.

4. На рис. 6 показана страница, которая появляется после ввода географических координат на предыдущей странице и на которой конкретизируются параметры прогноза, в том числе выставляется максимальная заблаговременность. Эта страница отличается еще тем, что требует ввода подтверждающего кода. Обычно подобные окна на сайтах делаются для исключения автоматического получения информации вредоносными программами. Но это затягивает работу с сайтом, так как для каждой точки необходимо будет вводить код в соответствующее поле.



Рис. 6. Страница с конкретными параметрами прогноза.

5. Можно получить прогнозные значения метеорологических характеристик в виде графиков или в виде текстового файла (рис. 7, 8).

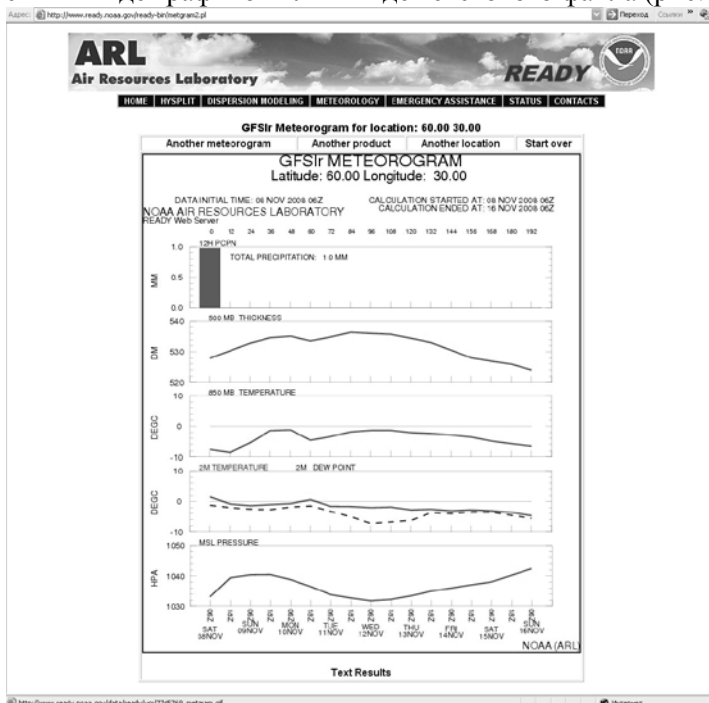


Рис. 7. Страница с результатами по запросу в виде графиков.

GFS12#  
 Latitude: 60.00 Longitude: 30.00 E  
 DATA INITIAL TIME: 08 NOV 2008 06Z  
 CALCULATION STARTED AT: 08 NOV 2008 06Z  
 HOURS OF CALCULATION: 192 h

FIELD	MSL PRESSURE	TEMPERATURE	DEW POINT	TEMPERATURE	THICKNESS	HEIGHT	12H PCPN
LEVEL	HPA	2M	2M	500 MB	500 MB	500 MB	MM
UNITS		DEGC	DEGC	DEGC	DM	DM	
HR							
+ 0.	1033.1	1.6	-1.2	-7.6	527.9	554.1	0.98
+ 12.	1039.4	-0.0	-2.1	-0.6	530.3	561.1	0.00
+ 24.	1040.4	-1.4	-2.6	-5.4	532.0	564.5	0.00
+ 36.	1040.5	-1.0	-2.7	-1.4	534.6	566.5	0.00
+ 48.	1038.8	-0.7	-1.9	-1.2	535.1	565.8	0.00
+ 60.	1036.5	0.6	-1.5	-4.6	533.6	562.4	0.00
+ 72.	1033.9	-1.6	-3.3	-3.4	534.9	561.7	0.00
+ 84.	1032.7	-1.7	-5.1	-1.9	536.4	562.3	0.00
+ 96.	1031.8	-2.0	-7.3	-1.4	536.1	561.3	0.00
+108.	1032.2	-1.9	-6.8	-1.4	535.8	561.5	0.00
+120.	1033.1	-2.8	-6.3	-2.1	534.1	560.8	0.00
+132.	1035.0	-2.6	-3.7	-2.4	533.0	560.9	0.00
+144.	1036.0	-3.1	-4.0	-2.9	530.5	559.2	0.00
+156.	1037.0	-2.8	-3.5	-3.5	528.0	557.3	0.00
+168.	1038.0	-3.1	-3.5	-4.9	526.9	556.8	0.00
+180.	1040.2	-3.6	-4.6	-5.8	525.9	557.2	0.00
+192.	1042.1	-4.7	-5.6	-6.6	524.0	556.7	0.00

Рис. 8. Страница с результатами по запросу в виде таблицы со значениями через каждые 12 часов до 192 часов (8 суток).

Для расчетов удобнее использовать прогнозы в виде таблицы. Информация копируется прямо со страницы и вставляется в приложение электронных таблиц *Excel*, где происходит формирование общей таблицы, содержащей только прогнозные осадки через 12 часа в заданной точке. Подобное действие необходимо для корреляции полученных данных с приложением *Surfer*, в котором строятся карты, изображающие распределение водности по территории Северо-Западного региона.

### в) Прогноз по уравнениям из разд. 3.

Выражения для прогноза получаются из уравнений (3) и (4): для модели склонового стока первого порядка

$$Q_{i+1} = \left(-\frac{1}{k\tau} Q_i + \frac{\dot{X}_i}{\tau}\right) \Delta t - Q_i; \quad (9)$$

для модели склонового стока второго порядка

$$Q_{i+1} = \frac{(\dot{X}_i / \tau_i - Q_i / k\tau_1) \Delta t^2 + Q_i (((\tau_2 + k\tau_1) / k\tau_1) \Delta t + 2\tau_2) - \tau_2 Q_{i-1}}{(\tau_2 + ((\tau_2 + k\tau_1) / k\tau_1) \Delta t)}. \quad (10)$$

## Примеры листингов с алгоритмом прогноза.

### Листинг 1 (модель первого порядка).

```
0  #include <iostream>
1  #include <fstream>
2  using namespace std;
3
4  //объявление переменных
5  int t, i, j;
6  int dt = 1;
7  float T1;
8  float tau, Kst, P, a;
9  float X[15]; //интенсивность осадков (фактические)
10 float T[15]; //массив фактических температур
11 float Xpr[8]; // массив прогнозных осадков
12 float Tpr[8]; //массив прогнозных температур
13 float Q[15]; //фактические расходы
14 float Qp[15]; //оптимизация
15 float Qpr[8]; // прогнозные расходы
16 float Sum, S, delta=0, deltasr, Sums=0, Sigma, Kr, dop;
17 float opr;
18 float Kr_o=100, P_o=0, Kst_o=0.1, tau_o=0, a_o=0;
19 int F = 1690; //площадь водосбора
20
21 void Multi();
22
23 int main()
24 {
25
26 //получение расходов из файла
27 ifstream fin;
28 fin.open ("QXT 4.txt");
29 if (fin.fail()) //если файл с исходными данными не откроется
30 {
31 ofstream finl;
32 finl.open("Error.txt");
33 finl << "4"<<"\n";
34 finl.close();
35 exit(1);
36 }
37 for (i=0; i<15; i++)
38 {
39 fin >>Q[i];
40 //получение осадков из файла
41 fin >>X[i];
42 //получение температуры
43 fin >>T[i];
44 }
45 fin.close();
46
```

```

47 //расчет допустимой погрешности
48 for (t=0; t<15; t++)
49 { delta +=(Q[t]-Q[t+1]);}
50 deltasr = delta/14;
51 for (t=0; t<15; t++)
52 { Sums += ((Q[t]-Q[t+1])-deltasr)*((Q[t]-Q[t+1])-deltasr);}
53 Sigma = sqrt(Sums/14);
54 dop = 0.674*Sigma;
55
56 Multi();
57
58 //вывод в файл
59 ofstream fout;
60 fout.open ("k_tau.txt", ios::app);
61 fout<<"\n"<<"Pchevsa-Belaya"<<"\n";
62 fout << "Kr_o " << Kr_o << "\n";
63 fout << "P_o " << P_o << "\n";
64 for (i=0; i<15; i++)
65 fout << i << "\t" << Q[i] << "\t" << Qp[i]<<endl;
66 fout.close();
67
68 //прогноз
69 ifstream finXT;
70 finXT.open ("XT 4.txt");
71 for (i=0; i<8; i++)
72 {
73 finXT >>Xpr[i];
74 finXT >>Tpr[i];
75 }
76 finXT.close();
77 T1=T[14];
78 for (t=1; t<9; t++)
79 {
80
81     if (t==1)
82         Qpr[t]=(Xpr[t-1]+a_o*T1)/tau_o - Q[t-1]/(tau_o*Kst_o)
+ Q[t-1];
83     else
84         Qpr[t]=(Xpr[t-1]+a_o*T1)/tau_o - Qpr[t-
1]/(tau_o*Kst_o) + Qpr[t-1];
85     T1=T1+Tpr[t-1];
86 }
87
88 ofstream foutPr;
89 foutPr.open ("Prognoz.txt", ios::app);
90 foutPr<<"1235.218"<<"\n"<<"1911.8085"<<"\n";
91 //координаты поста в Surfer
92 for (i=1; i<9; i++)
93 { if (Qpr[i]<0)

```



```

93  foutPr<<"0.33"<<"\n"; // минимальный модуль стока
94  else
95      foutPr<<(Qpr[i]*1000/F)<<"\n"; // перевод расхода в модуль
      стока
96  }
97
98  foutPr.close();
99  return 0 ;
100 }
101
102 void Multi()
103 {
104     //поверочный прогноз
105     for (a=0; a<20; a+=0.1)
106     {
107         for (tau=0; tau<20; tau+=0.1)
108         {
109             for (Kst=0.1; Kst<1.1; Kst+=0.1)
110             {
111                 opr=0;
112                 for (t=1; t<15; t++)
113                 {
114                     if (t==1)
115                         Qp[t]=(X[t-1]+a*T[t-1])/tau - Q[t-1]/(tau*Kst) + Q[t-
116 1];
117                     else
118                         Qp[t]=(X[t-1]+a*T[t-1])/tau - Qp[t-1]/(tau*Kst) +
119 Qp[t-1];
120
121                     Sum += (Q[t]-Qp[t])*(Q[t]-Qp[t]);
122                     if ((abs(Q[t]-Qp[t]))<=dop)
123                         opr+=1;
124                 }
125             }
126             //критерий эффективности методики
127             S = sqrt(Sum/(14));
128             Sum = 0;
129             Kr = S/Sigma;
130             P = (opr/14)*100;
131             //оптимальные коэф-т стока и вр. доб.
132             if ((Kr<=Kr_o) && (P>=P_o))
133                 { Kr_o=Kr; P_o=P; Kst_o=Kst; tau_o=tau; a_o=a;}
134         }
135     }
136 }

```

## Листинг 2 (модель второго порядка).

```
0  #include <iostream>
1  #include <fstream>
2  using namespace std;
3
4  //объявление переменных
5  int t, i, j;
6  int dt = 1;
7  float tau, Kst, P, a, taul;
8  float X[15]; //интенсивность осадков (фактические данные)
9  float Xpr[8]; //интенсивность осадков (прогнозные данные)
10 float Q[15]; //фактический расход
11 float Qp[15]; //массив для оптимизации
12 float Qpr[8]; // прогнозные расходы
13 float Sum, S, delta=0, deltasr, Sums=0, Sigma, Kr, dop;
14 float opr;
15 float Kr_o=100, P_o=0, Kst_o=0.1, tau_o=0, taul_o=0;
16 int F = 13200; //площадь водосбора
17
18 void Multi();
19
20 int main()
21 {
22
23     //получение расходов из файла
24     ifstream fin;
25     fin.open ("QXT 6.txt");
26     if (fin.fail())//если файл с исходными данными не откроется
27     {
28         ofstream finl;
29         finl.open("Error.txt");
30         finl << "6"<<"\n";
31         finl.close();
32         exit(1);
33     }
34     for (i=0; i<15; i++)
35     {
36         fin >>Q[i];
37         //получение осадков из файла
38         fin >>X[i];
39     }
40     fin.close();
41
42     //расчет допустимой погрешности
43     for (t=0; t<15; t++)
44     { delta +=(Q[t]-Q[t+1]);}
45     deltasr = delta/14;
46     for (t=0; t<15; t++)
47     { Sums += ((Q[t]-Q[t+1])-deltasr)*((Q[t]-Q[t+1])-deltasr);}
48
49 }
```

```

48 Sigma = sqrt(Sums/14);
49 dop = 0.674*Sigma;
50
51 Multi();
52
53 //ВЫВОД В ФАЙЛ
54 ofstream fout;
55 fout.open ("k_tau.txt", ios::app);
56 fout<<"\n"<<"Msta-Poterpelisa"<<"\n";
57 fout << "Kr_o " << Kr_o << "\n";
58 fout << "P_o " << P_o << "\n";
59 for (i=0; i<15; i++)
60 fout << i <<"\t"<< Q[i] <<"\t"<< Qp[i]<<endl;
61 fout.close();
62
63 //прогноз
64 ifstream finXT;
65 finXT.open ("XT 6.txt");
66 for (i=0; i<8; i++)
67 {
68 finXT >>Xpr[i];
69 }
70 finXT.close();
71 for (t=1; t<9; t++)
72 {
73 if (t==2)
74 Qpr[t]=(Xpr[t-1]/tau_o - Q[t-1]/(Kst_o*tau_o) + Q[t-
1]*(2*taul_o+(taul_o + Kst_o*taul_o)/(Kst_o*tau_o))-
taul_o*Q[t-2])/(taul_o+(taul_o +
Kst_o*tau_o)/(Kst_o*tau_o));
75 if (t==3)
76 Qpr[t]=(Xpr[t-1]/tau_o - Qpr[t-1]/(Kst_o*tau_o) +
Qpr[t-1]*(2*taul_o+(taul_o + Kst_o*taul_o)/(Kst_o*tau_o))-
taul_o*Q[t-2])/(taul_o+(taul_o +
Kst_o*tau_o)/(Kst_o*tau_o));
77 if (t>3)
78 Qpr[t]=(Xpr[t-1]/tau_o - Qpr[t-1]/(Kst_o*tau_o) +
Qpr[t-1]*(2*taul_o+(taul_o + Kst_o*taul_o)/(Kst_o*tau_o))-
taul_o*Qpr[t-2])/(taul_o+(taul_o +
Kst_o*tau_o)/(Kst_o*tau_o));
79 }
80 ofstream foutPr;
81 foutPr.open ("Prognoz.txt", ios::app);
82 foutPr<<"1562.429667"<<"\n"<<"1492.825833"<<"\n";
83 //координаты поста для Surfer
84 for (i=1; i<9; i++)
85 { if (Qpr[i]<0)
86 foutPr<<"0.92"<<"\n"; //минимальный модуль стока для этого
поста

```

```

86  else
87      foutPr<<(Qpr[i]*1000/F)<<"\n"; //расчет модулей стока
88  }
89
90  foutPr.close();
91  return 0 ;
92  }
93
94  void Multi()
95  {
96  //поверочный прогноз
97  for (taul=0; taul<100; taul+=0.5)
98  {
99  for (tau=0; tau<20; tau+=0.1)
100 {
101 for (Kst=0.1; Kst<1.1; Kst+=0.1)
102 {
103     opr=0;
104     for (t=1; t<15; t++)
105     {
106         if (t==2)
107             Qp[t]=(X[t-1]/tau - Q[t-1]/(Kst*tau) + Q[t-
108 1]* (2*taul+(taul+Kst*taul)/(Kst*tau)) - taul*Q[t-2]) /
109             (taul+(taul+Kst*tau)/(Kst*tau));
110         if (t==3)
111             Qp[t]=(X[t-1]/tau - Qp[t-1]/(Kst*tau) + Qp[t-
112 1]* (2*taul+(taul+Kst*taul)/(Kst*tau))- taul*Q[t-
113 2])/(taul+(taul+Kst*tau)/(Kst*tau));
114         if (t>3)
115             Qp[t]=(X[t-1]/tau - Qp[t-1]/(Kst*tau) + Qp[t-
116 1]* (2*taul+(taul+Kst*taul)/(Kst*tau)) - taul*Qp[t-
117 2])/(taul+(taul+Kst*tau)/(Kst*tau));
118
119         Sum += (Q[t]-Qp[t])*(Q[t]-Qp[t]);
120         if ((abs(Q[t]-Qp[t]))<=dop)
121             opr+=1;
122     }
123     //критерий эффективности методики
124     S = sqrt(Sum/(14));
125     Sum = 0;
126     Kr = S/Sigma;
127     P = (opr/14)*100;
128     //оптимальные коэф-т стока и вр. доб.
129     if ((Kr<=Kr_o) && (P>=P_o))
130     { Kr_o=Kr; P_o=P; Kst_o=Kst; tau_o=tau; taul_o=taul;}
131 }
132 }
133 }
134 }

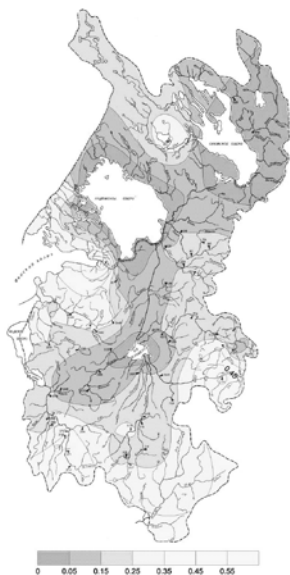
```

## 6. Построение прогнозных картосхем

Используя ГИС-технологии (*Surfer*), строим серию картосхем распределения прогнозных расходов (в модулях) на каждые из 8 суток. С целью автоматизации построения карт в *Surfer* написан script-файл.

На рис. 9–12 представлен иллюстративный пример фонового прогноза. Прогнозные осадки на 8 суток брались из Интернет-ресурса [westwind.ch](http://westwind.ch). Картосхемы строились по 52 станциям, список которых приведен в табл. 1. Для прогноза использовались коэффициенты стока и время добегаания, полученные по ретроспективному материалу.

а)



б)

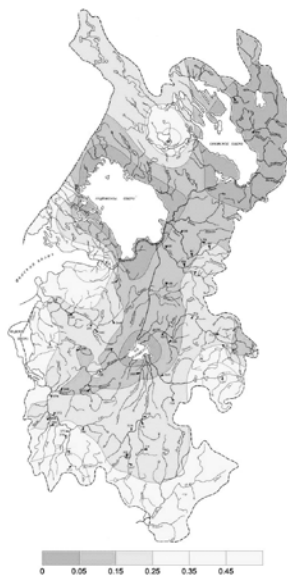


Рис. 9. Распределение водности (модуля стока) по территории Северо-Западного региона через сутки (а) и через двое суток (б).

*a)*



*б)*

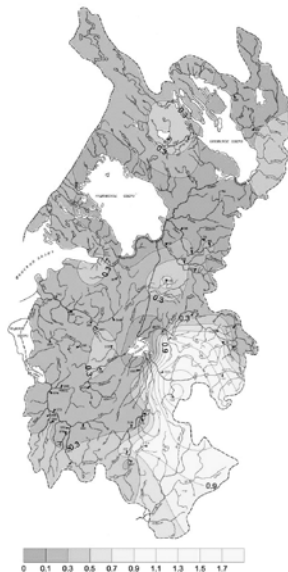
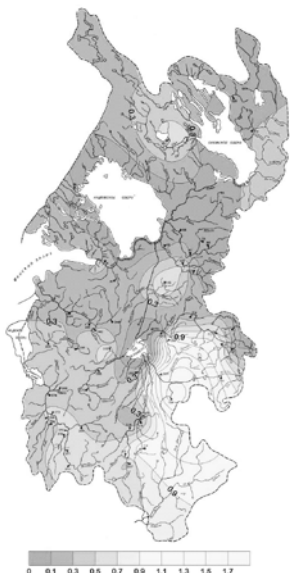


Рис. 10. Распределение водности (модуля стока) по территории Северо-Западного региона через трое суток (*a*) и через четверо суток (*б*).

*a)*



*б)*

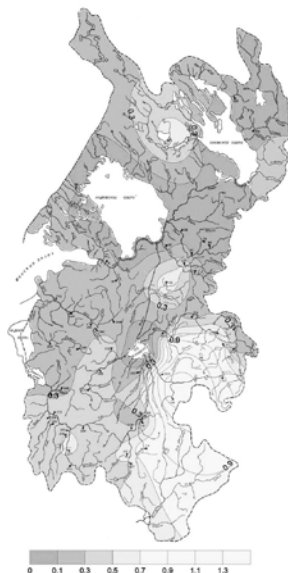
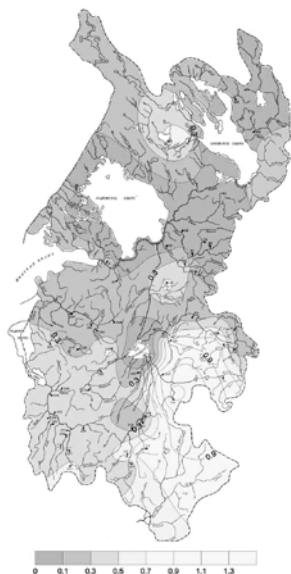


Рис. 11. Распределение водности (модуля стока) по территории Северо-Западного региона через пять суток (*a*) и через шесть суток (*б*).

a)



б)

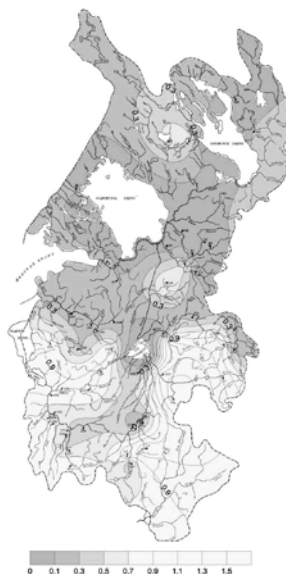


Рис. 12. Распределение водности (модуля стока) по территории Северо-Западного региона через семь суток (а) и через восемь суток (б).

## 7. Построение картосхемы тенденции изменения водности на территории Северо-Западного региона за 8 суток

Наложив схемы с рис. 9–12 друг на друга, можно получить наглядную картину динамики увеличения и уменьшения водности на территории (рис. 13).

После построения и анализа обобщенной картосхемы тенденции изменения водности за 8 дней можно сформулировать рекомендации по минимизации социально-экономического ущерба с помощью производственных функций.

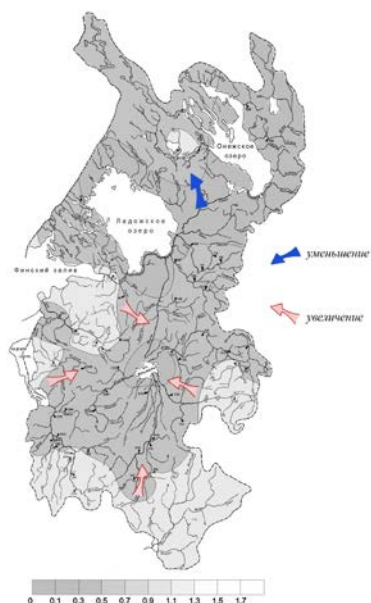


Рис. 13. Динамика изменения модулей стока в течение восьми суток.

## 8. Включение в методику уровней воды (прогноз зон затопления)

Во многих практических случаях важны не прогнозные расходы (пусть даже фоновые, по огромной территории и в динамике на 8 суток вперед), а уровни воды, от которых зависит подтопление дорог, населенных пунктов, мостов и т.п. (хотя и прогноз низких уровней не менее важен, так как ими могут лимитироваться экологические показатели, оголения водозаборов и т. д.).

При использовании для прогноза расхода уравнения (1) мы используем ежедневные расходы воды как для обеспечения математической корректности самого прогноза (задание начального условия), так и для сравнения прогнозных значений с фактическими (а также при оптимизации параметров  $k$  и  $\tau$ ). Но ведь реально расходы измеряют не более нескольких десятков за год. Для получения же ежедневных их значений пользуются всевозможными косвенными методами учета стока, в основном зависимостью расхода от уровня  $Q = f(H)$ . Потому для того, чтобы перейти от расхода к уровню достаточно в моделях (1) и (2) вместо расхода подставить функции  $f(H)$ :



$$\frac{df(H)}{dt} = -\frac{1}{k\tau} f(H) + \frac{\dot{X}}{\tau}. \quad (11)$$

Рассмотрим в качестве примера р. Тихвинка – д. Горелуха. График зависимости  $Q = f(H)$  представлен на рис. 14.

Аппроксимирующая зависимость, полученная методом наименьших квадратов ( $R^2 = 0,93$ ), имеет вид:

$$Q = 60.797 - 0.678H + 0.0023H^2. \quad (12)$$

Подставляя это выражение в прогностическое уравнение (11), получим алгоритм прогноза уровней воды (при  $dt \approx \Delta t = 1$ ):

$$f(H_{i+1}) = f(H_i)/(k\tau) + \dot{X}_i / \tau + f(H_i). \quad (13)$$

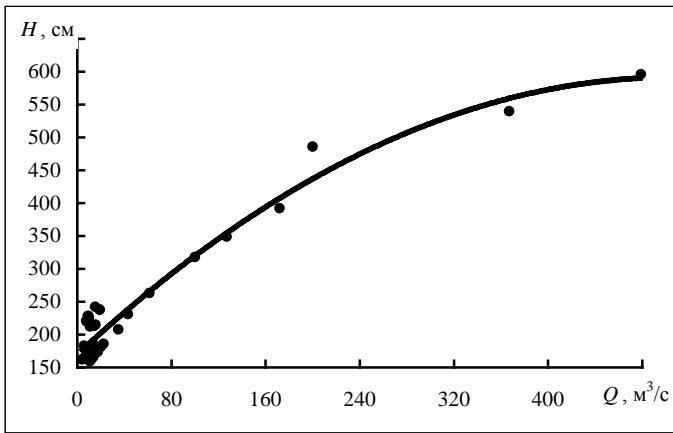


Рис. 14. График зависимости  $Q = f(H)$ .

Методика его использования ничем не отличается от предыдущей. Однако, имея фоновый прогноз уровней и используя ту же самую ГИС-технология, можно строить прогнозные карты, показывающие динамику затопляемых или осушаемых площадей (рис. 15). Это позволяет информировать потребителей не просто о динамике ожидаемых расходов, а о реальной угрозе территориям и степени этой угрозы.

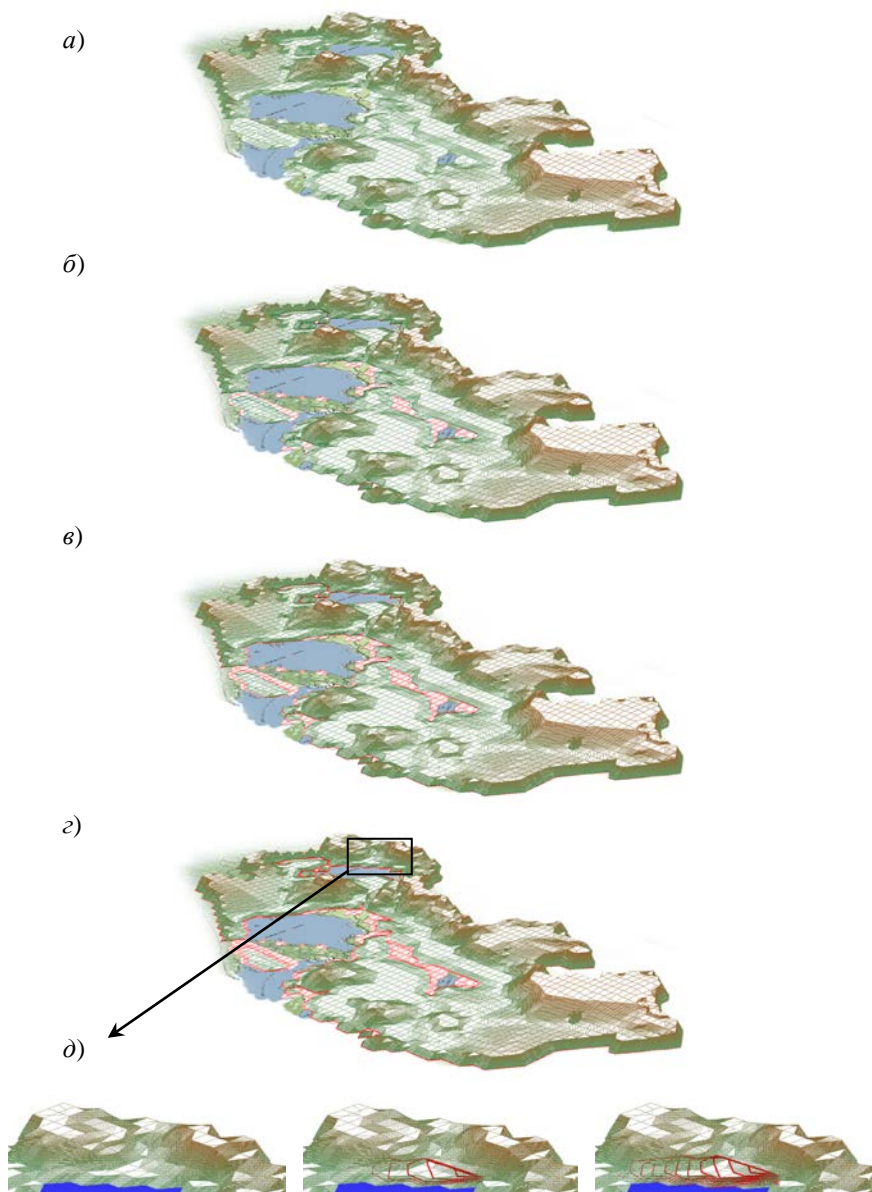


Рис. 15. Пример динамики распространения зон затопления на 3 суток (а–д) и для бассейна р. Водла – с. Харловская (е) (красным цветом обозначены затопляемые территории).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие – первая попытка использовать в учебном процессе по курсу «Гидрологические прогнозы» совместно современные математические модели, компьютерные технологии и Интернет-ресурсы для прогнозирования динамики затопления территорий на основе ГИС-технологий. В дальнейшем намечается перейти от использования динамических моделей к стохастическим. Научный задел по этому вопросу имеется (см. шестую позицию в перечне основной литературы на стр. 3). Это откроет возможность прогнозировать не просто затопление тех или иных территорий, но и вероятность, с которой могут происходить подобные события.

Более детальная оценка экономических (и экологических) последствий ожидаемых наводнений требует привлечения производственных функций затопляемых («осушаемых») предприятий и населенных пунктов. Методика подобных оценок разработана (см. вторую позицию в перечне литературы на стр. 3), но эти вопросы выходят за рамки программы курса «Гидрологические прогнозы», хотя они не менее (а может быть и более) важны, чем сами прогнозы.

Учебное пособие частично основано на результатах НИР, выполненных при финансовой поддержке мэрии Санкт-Петербурга (грант № 196/08) и Министерства образования и науки РФ в рамках нескольких грантов, полученных кафедрой гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В.* Гидрологические прогнозы. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.
2. *Коваленко В. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В.* Моделирование гидрологических процессов. Учебник. – Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
3. *Коваленко В. В., Гайдукова Е. В.* Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть I. Динамические модели» (на базе языка C++). Учебное пособие. – СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – 152 с.
4. *Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Викторова Н. В.* Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть II. Стохастические модели» (на базе языка C++). Учебное пособие. – СПб.: изд. РГГМУ, 2012. – 247 с.
5. *Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Викторова Н. В.* Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть III. Частично инфинитное моделирование» (на базе языка C++ Builder). Учебное пособие. – СПб.: изд. РГГМУ, 2013. – 102 с.
6. *Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Девятков В. С.* Фоновое прогнозирование процесса формирования суточных вероятностных стоковых характеристик // «Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета», № 18, 2011. – С. 10–20.
7. *Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Викторова Н. В., Громова М. Н., Шевнина Е. В., Девятков В. С.* Методика фонового краткосрочного прогнозирования изменения водности // «Метеорология и гидрология», № 10, 2012. – С. 65–70.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Технология проведения дежурства в учебном бюро гидрологических прогнозов	3
1. Схема Северо-Западного региона и местоположение гидропостов	3
2. Получение данных оперативных наблюдений	6
3. Используемые математические модели формирования расходов воды	7
4. Конечно-разностная аппроксимация используемых моделей	8
5. Технология прогноза склонового стока	8
6. Построение прогнозных картосхем	21
7. Построение картосхемы тенденции изменения водности на территории Северо-Западного региона за 8 суток	23
8. Включение в методику уровней воды (прогноз зон затопления)	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	27
ЛИТЕРАТУРА	28

Учебное издание

Виктор Васильевич Коваленко  
Екатерина Владимировна Гайдукова  
Наталья Владимировна Викторова

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ:  
МОДЕЛИ И ГИС-ТЕХНОЛОГИИ  
ПРИ КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ  
ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОСТИ

Учебное пособие

Редактор: *И.Г. Максимова*

ЛР № 020309 от 30.12.96

---

Подписано в печать 23.05.13. Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Гарнитура Times New Roman.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,9. Тираж 200 экз. Зак. № 173.

РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр. 98.

Отпечатано в ЦОП РГГМУ

---