

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ КРАТКОСРОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЕЙ ВОДЫ НА УЧАСТКАХ РЕК

А.Д. Анашечкин, кандидат технических наук, доцент;

Е.Н. Трофимец, кандидат педагогических наук, доцент.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Рассмотрены методы прогнозирования уровней воды на участках рек. Проведен сравнительный анализ статистических методов прогнозирования дождевых паводков, обоснован выбор системы уравнений Сен-Венана. Предложена двухфакторная регрессионная модель для краткосрочного прогноза уровней воды на реке Ижора Ленинградской области. Определены направления дальнейшего совершенствования предложенной модели прогнозирования.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, математическая модель, прогнозирование, регрессия, дождевые паводки, гидрологические прогнозы, компьютерная модель

THE QUESTION OF BUILDING A SHORT-TERM PREDICTIVE MODELS OF WATER LEVELS ON STRETCHES OF THE RIVERS

A.D. Anashechkin; E.N. Trophimets.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCON of Russia

Methods of forecasting water levels on river sections are considered. The comparative analysis of statistical methods of forecasting rain floods, justified the choice of the system of equations of Saint-Venant. A two-factor regression model is proposed for the short-term forecast of water levels on the Izhora river in the Leningrad region. The directions of further improvement of the proposed forecasting model are determined.

Keywords: emergency, mathematical model, prediction, regression, rainfall events, hydrological forecasts, a computer model

В XXI в. одной из важных задач обеспечения безопасности жизнедеятельности населения страны является оперативно спланированная работа соответствующих органов управления в территориальных и ведомственных подсистемах единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) и их звеньях по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного характера.

Ликвидация ЧС является одной из самых актуальных задач, возложенных на силы и средства РСЧС. Повышение эффективности работы экстренных оперативных дежурных служб связано с моделированием процессов управления. В рамках решения задач моделирования большая роль отводится прогнозированию ЧС.

В работе рассматриваются вопросы, связанные с ЧС природного характера – наводнениями.

Наводнения нарушают жизнедеятельность населения и негативно воздействуют на окружающую среду [1, 2].

Цели и задачи прогностического центра в период наводнений – как можно точнее сделать прогноз уровней воды на участках рек. В таких случаях, как правило, наблюдается увеличение потока эмпирических данных и кадровых потребностей, так как должно быть подготовлено больше срочных прогнозов для большего числа пользователей [3, 4].

Разработка общих методик математического обеспечения, применения информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) для прогнозирования наводнений

является актуальной задачей для служб разного уровня в государственной структуре по предупреждению наводнений и ликвидации их последствий [5, 6].

В разработке технологий прогнозирования наука далеко продвинулась вперед. Специалисты в области ситуационного анализа и управления применяют методы нейросетевого прогнозирования и нечёткой логики, которые становятся актуальными в XXI в. Из разделов высшей математики в теоретической базе анализа объекта прогнозирования ведущее место пока занимают теория вероятностей и математическая статистика, теория численных методов анализа и оптимизации, современная теория факторного анализа, дифференциальные уравнения [7].

Относительно регулярные процессы, как правило, описываются математическими моделями с помощью дифференциальных уравнений в частных производных. На базе статистических моделей, моделей аппроксимации, моделей экстраполяции и интерполяции, моделей оценки влияния случайных факторов процесса разрабатываются прогностические модели по предупреждению наводнений.

В данной работе фокус внимания смещен на прогнозирование уровней воды на участках рек.

При прогнозировании уровней воды важно учитывать время и степень точности прогноза. Инженер-аналитик в области системного анализа и управления, который занимается прогнозированием уровней воды на участках рек, фактически, участвует в «гонках» со временем. Главная задача инженера-аналитика системного анализа и управления разработать надежные, простые математические модели, способные обеспечивать достаточную заблаговременность предупреждений и более высокую степень точности уровней воды на участках рек.

В процессе построения математической модели учитываются следующие факторы: количество имеющихся данных, тип и частота происходящих дождевых паводков, сложность моделируемых гидрологических процессов.

Прогностическая модель, включающая факторы, которые помогут повысить заблаговременность предупреждения и дать более высокую степень точности прогноза уровней воды на участках рек, требует тщательного подбора эмпирических данных.

В режиме реального времени данные по факту, необходимые для построения прогностической модели, как правило, отсутствуют. Поэтому для разработки математической модели прогнозирования уровней воды на участках рек используют эмпирические данные за предшествующие периоды дождевых паводков.

Прогностическая модель уровней воды на участках рек в результате дождевых паводков должна удовлетворять основным условиям:

- надежность краткосрочного прогноза;
- высокая степень точности;
- доступность для понимания и использования специалистами на уровне бакалавриата.

При построении краткосрочных моделей прогнозирования дождевых паводков используют два основных метода:

- метод, основанный на статистическом подходе;
- метод, основанный на механизме формирования и распространения дождевых паводков.

Значимую роль при создании прогностических моделей играют закономерности перемещения речных волн. В одномерном приближении они описываются дифференциальными уравнениями в частных производных Сен-Венана. Уравнения Сен-Венана являются базовой основой теоретической модели прогноза уровней воды на участках рек.

Математическая форма записи уравнений Сен-Венана имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{g} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\omega} \right) + \omega \frac{Q^2}{K^2} = -\omega \frac{\partial H}{\partial x}, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \end{cases}, \quad (1)$$

где Q – расход воды; H – уровень воды; ω – площадь поперечного сечения; K – модуль стока; q – боковой приток (отток) на единицу длины; g – ускорение свободного падения; x – расстояние, отсчитываемое вдоль потока; t – время.

Для полной замкнутости канонической системы уравнений (1) рационально задать соотношения, связывающие переменные H , ω , K :

$$K = \omega C \sqrt{R}; \quad (2)$$

$$\omega = f(H), \quad (3)$$

где C – скоростной коэффициент; R – гидравлический радиус, являющийся функцией уровня.

В общем случае каноническая система уравнений (1–3) не имеет аналитического решения. Поэтому для разработки практической модели прогноза каноническую систему уравнений следует интегрировать разностными методами или же использовать различные модификации этой канонической системы.

Степень отклонения неустановившегося режима от установившегося позволяет интерпретировать и обосновать выбранную модель.

Максимальное значение отношения абсолютного добавочного уклона водной поверхности (при прохождении волны паводка или половодья) к первоначальному уклону при установившемся режиме (i_y) является характеристикой этого отклонения:

$$\chi = \max \left| \frac{\partial H}{\partial x} + i_y \right| / i_y.$$

Ширина петли кривой расходов тем уже, чем меньше значение χ , а это значит, что связь расхода и уровня воды будут близки к однозначной.

В зависимости от перемещения паводочных волн методы прогноза расходов и уровней воды на участках рек можно разделить на три категории:

- методы, не учитывающие распластывание волны паводка;
- методы, основанные на приближенных уравнениях трансформации волны;
- методы, основанные на численном интегрировании уравнений Сен-Венана.

В практике наибольшее распространение получили методы первой категории.

В данной работе авторы использовали метод, относящийся к первой категории при построении краткосрочной модели прогнозирования уровней воды осеннего половодья реки Ижора – левого притока реки Невы [8].

Подъемы воды в дельте реки Невы и ее притоках, вызывающие затопление населенных пунктов, особенно характерны в периоды весеннего и осеннего половодья. Циклоны в Балтийском море с преобладанием западных ветров являются причиной подъема воды.

Для исследования уровней воды на участках рек авторы использовали методы изучения взаимосвязей и динамики процессов на основе многофакторной регрессии.

Построение краткосрочной модели прогнозирования уровней воды на участках реки Ижора состоит из следующих этапов:

- сбор эмпирических данных по максимальному уровню воды дождевых паводков реки Ижора с 2009–2015 гг. и данным гидрометцентра России;

- нахождение теоретического уравнения двухфакторной линейной регрессии;
- проверка значимости параметров регрессионной модели;
- сравнительный анализ фактических данных за 2016–2017 гг. с теоретическим уравнением регрессии;
- вычисление ошибки прогноза.

Для статистической обработки и анализа информации использовался табличный процессор MS Excel. Компьютерная модель прогноза уровней воды на участках рек была разработана при помощи статистических функций MS Excel и программной надстройки «Пакет анализа» [9].

Фрагмент эмпирических данных за 2009–2015 гг. по исходному уровню воды реки Ижора в начале дня (x_1), объему выпавших за день осадков (x_2) и уровню воды в конце дня ($y_{\text{факт}}$) представлен на рис. 1.

	A	B	C	D	E
1		Дата начала			
2	Год	выпадения паводко-	x_1, см	x_2, мм	$y_{\text{факт}}$, см
3		образующих осадков			
4	2009	6 сентября	198	13,8	232
5	2009	7 сентября	232	1,70	254
6	2009	8 сентября	254	0	271
7	2009	9 сентября	271	0	285
8	2009	10 сентября	285	0	291
9	2009	29 сентября	168	5,9	196
10	2009	2 октября	227	1,8	254
11	2009	3 октября	254	4,1	273
12	2009	5 октября	281	1,4	302
...					
37	2012	5 ноября	255	8,5	293
38	2012	6 ноября	293	16,3	324
39	2012	7 ноября	324	7,1	347
40	2013	28 октября	169	8	180
41	2013	29 октября	180	6	201
42	2013	30 октября	201	8	216
43	2013	05 ноября	214	16	282
44	2013	06 ноября	282	0,7	305
45	2014	8 октября	182	0,4	203
46	2015	11 ноября	160	4,7	174
47	2015	19 ноября	178	9	195
48	2015	20 ноября	195	3	213

Рис. 1. Эмпирические данные

На основе эмпирических данных были найдены коэффициенты a_1 , a_2 , b двухфакторного линейного уравнения регрессии $y_{\text{теор}}=a_1x_1+a_2x_2+b$, представленные на рис. 2. Полученное уравнение имеет вид:

$$y_{\text{теор}}=0,997x_1+1,263x_2+16,835.$$

a_2	a_1	b
1,263	0,997	16,835
0,275	0,035	8,789
0,952	11,707	#Н/Д
418,337	42,000	#Н/Д
114677,333	5756,667	#Н/Д

Рис. 2. Коэффициенты двухфакторного линейного уравнения регрессии

О высоком качестве построенной модели позволяет судить множественный коэффициент детерминации $R^2=0,952$ (рис. 3).

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,976
R-квадрат	0,952
Нормированный R-квадрат	0,950
Стандартная ошибка	11,707
Наблюдения	45

Рис. 3. Регрессионная статистика

На уровне надежности $\gamma=0,95$ проводилась проверка статистической значимости множественного коэффициента детерминации и параметров уравнения регрессии при помощи дисперсионного анализа. Проведенная проверка показала, что все параметры в уравнении регрессии статистически значимы (рис. 4).

На базе двухфакторного линейного уравнения регрессии были рассчитаны теоретические значения уровня воды реки Ижоры ($y_{\text{теор}}$) по эмпирическим данным об исходном уровне воды (x_1) и объеме выпавших осадков (x_2) за ряд осенних дней 2016–2017 гг.

Заключительный этап включал в себя сравнительный анализ рассчитанных теоретических значений $y_{\text{теор}}$ по уравнению регрессии с известными фактическими данными $y_{\text{факт}}$ в осенний период дождей паводков и вычисление абсолютной (ε^{abc}) и относительной (ε^{omi}) ошибок прогноза (рис. 5).

Дисперсионный анализ					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	114677,333	57338,667	418,337	1,853E-28
Остаток	42	5756,667	137,063		
Итого	44	120434			
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Станд_ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>
Y-пересечение	16,835	8,789	1,915	0,062	-0,902
Переменная X1	0,997	0,035	28,800	0,000	0,927
Переменная X2	1,263	0,275	4,596	0,000	0,709

Рис. 4. Дисперсионный анализ

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Дата начала						
2	Год	выпадения паводко-	x_1 , см	x_2 , мм	$Y_{\text{факт}}$, см	$Y_{\text{теор}}$, см	$\varepsilon^{\text{абс}}$, см	$\varepsilon^{\text{отн}}$, %
3		образующих осадков						
4	2016	28 октября	182	9	208	209,654	1,654	0,80%
5	2016	29 октября	208	6,8	219	232,797	13,797	6,30%
6	2016	30 октября	219	2	224	237,701	13,701	6,12%
7	2016	31 октября	224	0,4	227	240,665	13,665	6,02%
8	2016	8 ноября	183	18	194	222,019	28,019	14,44%
9	2016	19 ноября	193	2,4	247	212,285	34,715	14,05%
10	2016	20 ноября	247	13	394	279,511	114,489	29,06%
11	2016	21 ноября	394	0	443	409,648	33,352	7,53%
12	2016	22 ноября	443	0	456	458,500	2,500	0,55%
13	2016	23 ноября	456	0,5	460	472,092	12,092	2,63%
14	2016	24 ноября	460	10,3	466	488,459	22,459	4,82%
15	2017	7 сентября	180	10	224	208,923	15,077	6,73%
16	2017	13 сентября	230	21	280	272,667	7,333	2,62%
17	2017	14 сентября	280	5	302	302,307	0,307	0,10%
18	2017	9 октября	184	20	235	225,543	9,457	4,02%
19	2017	10 октября	235	3	260	254,916	5,084	1,96%
20	2017	11 октября	260	12	282	291,209	9,209	3,27%
21	2017	25 ноября	315	6,3	340	338,843	1,157	0,34%
22	2017	26 ноября	340	6,9	355	364,526	9,526	2,68%
23	Срзнач		275	7,7	306,105	301,172	18,294	6,00%

Рис. 5. Фактические и теоретические уровни воды с ошибкой прогноза

Сравнительный анализ позволяет утверждать, что рассчитанные теоретические значения уровня воды хорошо согласуются с данными по факту за 2016–2017 гг. За высокую надежность полученной прогнозной модели отвечает рассчитанная ошибка прогноза, равная 6 %. Компьютерную модель можно рекомендовать использовать в будущем для краткосрочного прогноза слоя стока дождевого паводка реки Ижора в осенние месяцы. При этом следует обратить внимание, что значения фактора x_2 – объема выпавших осадков – будут вводиться в модель на основе прогнозных данных Гидрометцентра.

В работе использовались краткосрочные данные Гидрометцентра на период прогноза от трех до пяти дней, поэтому и предложенная компьютерная модель обладает таким же краткосрочным прогнозом. Несмотря на краткосрочность прогноза, сотрудники МЧС России успеют заблаговременно предупредить население о возможном подтоплении и оперативно разработать план действий для предотвращения ЧС в период дождевых паводков.

В Центре управления кризисными ситуациями МЧС России используется платформа ArcGIS для моделирования процесса затоплений на базе геоинформационных систем.

Используя геоинформационный программный продукт ArcGIS, специалисты по геоинформационным системам могут анализировать и прогнозировать уровень воды на гидропостах в период паводка и оценивать последствия.

Информационной основой платформы ArcGIS является база геоданных «ArcHydro».

Следует отметить, что основными этапами ситуационного процесса моделирования затоплений являются:

- регистрация данных – замеры на гидропостах (уровни воды);
- анализ данных – сбор данных о прошлых паводках и краткосрочное прогнозирование развития текущего паводка;

- оценка данных – получение аналитических зависимостей;
- определение зон затопления – подбор данных дистанционного зондирования, которые по ряду факторов близки к ситуации заданного дня паводка.

Результаты ситуационного процесса моделирования сохраняются в отдельной базе геоданных и могут быть повторно использованы. Отчеты краткосрочного прогноза можно формировать в формате Microsoft Word, включающие в себя информацию в виде текста, таблиц и диаграмм.

Практическая значимость работы состоит в том что:

- выявлены недостатки используемых методов прогнозирования уровней воды на участках рек;
- обоснована актуальность методов краткосрочного прогнозирования уровней воды на участках рек в период паводков, имеющих катастрофические последствия;
- сформулированы основные положения системного подхода при моделировании ЧС на основе изучения взаимосвязей и динамики процессов в период дождевых паводков;
- определен перечень ритмозадающих факторов, моделирующих наводнения;
- проанализирована каноническая система уравнений Сен-Венана;
- предложена компьютерная модель, позволяющая составлять краткосрочные прогнозы в период дождевых паводков.

Литература

1. Бурцев А.А., Топольский Н.Г. Оценка опасности наводнений на основе данных мониторинга // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 3. С. 15–19.

2. Топольский Н.Г., Гаврилов А.С. Космические и авиационные технологии мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 3 (55). С. 16.

3. Антюхов В.И., Остудин Н.В. Алгоритмизация деятельности должностных лиц центров управления в кризисных ситуациях МЧС России // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 2 (72). С. 220–228.

4. Грешных А.А., Комарова М.Е., Кудряков С.А. Тренировка зрительного восприятия информации у работников диспетчерских и оперативных служб // Проблемы управления рисками в техносфере. 2012. № 1 (21). С. 121–128.

5. Вопросы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: Указ Президента Рос. Федерации от 11 июля 2004 г. № 868 (в ред. от 10 марта 2014 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

6. О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: постановление Правительства Рос. Федерации от 30 дек. 2003 г. № 794 (с изм. и доп.). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

7. Системный анализ в управлении: учеб. пособие / Анфилатов В.С. [и др.]; под ред. А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

8. Баканова А.О., Трофимец Е.Н. Разработка модели прогноза слоя дождевого паводка реки Ижора // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: сб. материалов IX Всерос. науч.-практ. конф. курсантов, слушателей, студентов и молодых ученых с междунар. участием. Воронеж, 2018. С. 37–40.

9. Трофимец Е.Н. Прикладная математическая статистика в Excel: учеб. пособие. Ярославль, 2013. Ч. 2. 128 с.

References

1. Burcev A.A., Topol'skij N.G. Ocenka opasnosti navodnenij na osnove dannyh monitoringa // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2016. № 3. S. 15–19.
2. Topol'skij N.G., Gavrilov A.S. Kosmicheskie i aviacionnye tekhnologii monitoringa i prognozirovaniya chrezvychajnyh situacij // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2014. № 3 (55). S. 16.
3. Antyuhov V.I., Ostudin N.V. Algoritmizaciya deyatel'nosti dolzhnostnyh lic centrov upravleniya v krizisnyh situacijah MCHS Rossii // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2017. № 2 (72). S. 220–228.
4. Greshnyh A.A., Komarova M.E., Kudryakov S.A. Trenirovka zritel'nogo vospriyatiya informacii u rabotnikov dispetcherskih i operativnyh sluzhb // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2012. № 1 (21). S. 121–128.
5. Voprosy Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situacijam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij: Ukaz Prezidenta Ros. Federacii ot 11 iyulya 2004 g. № 868 (v red. ot 10 marta 2014 g.). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tantPlyus».
6. O edinoj gosudarstvennoj sisteme preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnyh situacij: postanovlenie Pravitel'stva Ros. Federacii ot 30 dek. 2003 g. № 794 (s izm. i dop.). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Garant».
7. Sistemnyj analiz v upravlenii: ucheb. posobie / Anfilatov V.S. [i dr.]; pod red. A.A. Emel'yanova. M.: Finansy i statistika, 2002. 368 s.
8. Bakanova A.O., Trofimec E.N. Razrabotka modeli prognoza sloya dozhdevogo pavodka reki Izhora // Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij: sb. materialov IX Vseros. nauch.-prakt. konf. kursantov, slushatelej, studentov i molodyh uchenyh s mezhdunar. uchastiem. Voronezh, 2018. S. 37–40.
9. Trofimec E.N. Prikladnaya matematicheskaya statistika v Excel: ucheb. posobie. Yaroslavl', 2013. Ch. 2. 128 s.