

С. В. ИВАНОВ, А. А. ВИШЕРАТИН, Д. А. НАСОНОВ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

## МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ РЕДКОЙ ПОВТОРЯЕМОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ОТ НАВОДНЕНИЙ

Рассмотрен метод реконструкции нагонных наводнений, основанный на построении синтетического циклона, форма и траектория движения которого определяется по ретроспективным метеорологическим данным. Метод может использоваться для исследования чувствительности формы наводнений к локальной изменчивости погодных условий, а также при конструировании ансамблей синоптических ситуаций с целью тестирования систем прогнозирования и предотвращения наводнений.

*Ключевые слова:* синтетический сценарий, комбинированный метод, предотвращение наводнений, ансамбль синоптических ситуаций, ретроспективные данные, реконструкция экстремальных природных явлений.

Нагонные наводнения в Санкт-Петербурге относятся к экстремальным природным явлениям редкой повторяемости (за время существования города угроза наводнения возникала в среднем один раз в год). Традиционно для решения таких задач используются методы статистики экстремальных значений, позволяющие получить оценки подъемов уровня, возможных 1 раз в 100 и более лет [1], эти величины могут рассматриваться как основа для оценок рисков и использоваться, например, при проектировании защитных сооружений или объектов берегозащиты. Вместе с тем оперативная эксплуатация защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений требует более полной информации о потенциально возможных наводнениях, включая, например, характеристики движения нагонной волны в Финском заливе и темпы роста уровня воды в различных пунктах наблюдений. Эта потребность связана, в первую очередь, с необходимостью настройки методов и алгоритмов, обеспечивающих работу системы предотвращения угрозы наводнений: в силу того что наводнения бывают достаточно редко, опираться только на ретроспективные данные не представляется возможным. Дополнительно такая информация может использоваться для построения синтетических сценариев особо опасных наводнений, применяемых как для тестирования самой системы, так и для обучения ее персонала.

Существует два подхода к построению оценок экстремальных природных явлений редкой повторяемости:

— реконструкция экстремальных природных явлений на основе статистики многомерных экстремумов. Этот подход позволяет параметризовать исходное явление в форме многомерной случайной величины, для которой определяется многообразие, соответствующее одинаковой повторяемости сочетаний значений ее компонентов. Подход, несмотря на формальную обоснованность, требует введения дополнительной функции риска для выбора целевого значения многомерного экстремума, поскольку в такой логике разные сочетания параметров (например, высоты пика наводнения и его длительности) могут иметь одну и ту же вероятность появления;

— реконструкция экстремальных природных явлений на основе синтетических штормов. Подход предусматривает построение некоторого сценария на основе комбинации элементов исторических экстремальных явлений таким образом, чтобы получившийся в результате многомерный объект (например, циклон или шторм) обладал наиболее выраженными экстремальными свойствами с точки зрения какого-либо целевого процесса (например, раз-

мыва берегов, затопления территории и пр.). Получаемые при этом результаты достаточно реалистичны, однако вследствие зависимости между компонентами многомерного экстремума, характеризующего его составляющие, не всегда возможно корректно оценить вероятность появления конкретного синтетического шторма.

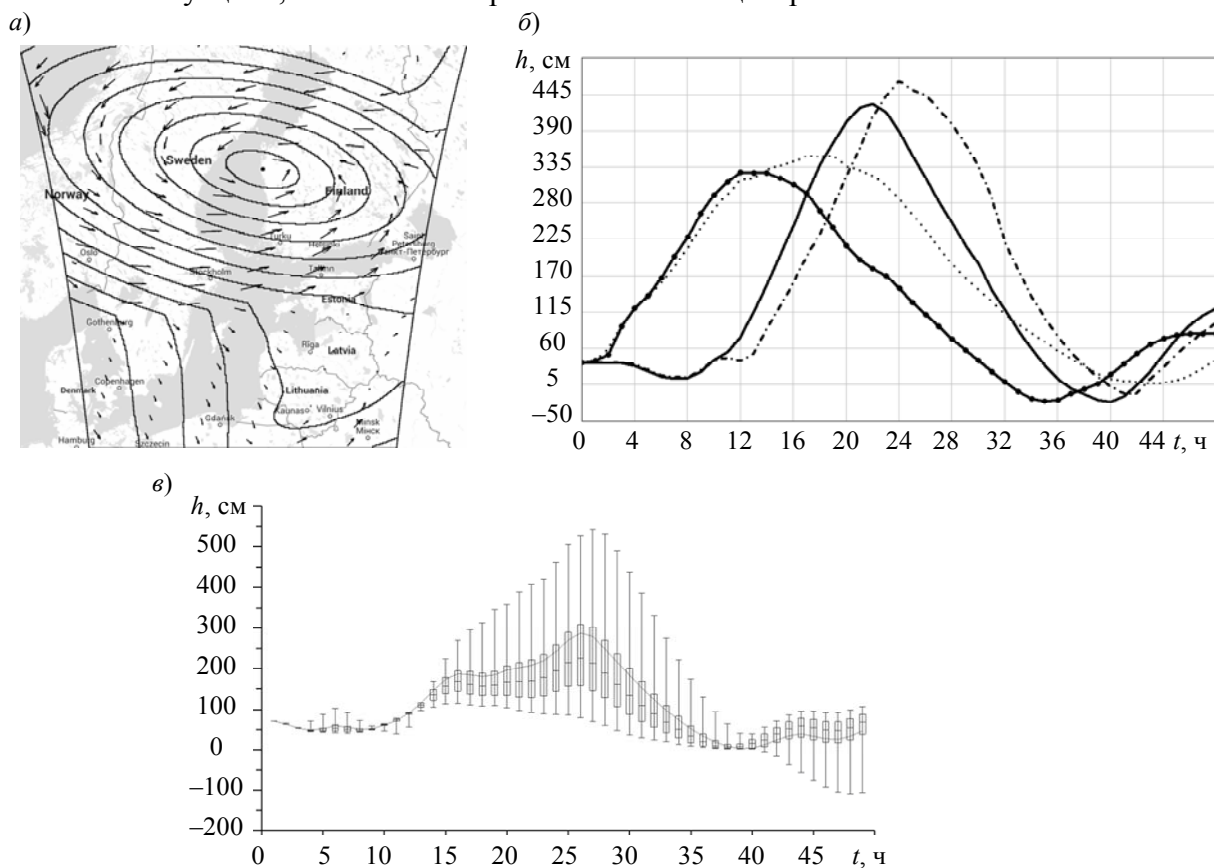
Для реконструкции нагонных наводнений редкой повторяемости, возникающих в восточной части Финского залива, предложен комбинированный метод, сочетающий в себе возможности и первого, и второго подходов. Он основан на том, что каждому наводнению ставится в соответствие синтетический циклон (или даже последовательность циклонов для наводнений с несколькими пиками), который в каждый момент времени характеризуется набором пространственных характеристик, таких как минимальное приземное давление, площадь циклона, коэффициент анизотропии, скорость движения и глубина циклона. Кроме того, для каждого синтетического циклона задается траектория движения, соответствующая историческим ситуациям [2]. При этом сам синтетический циклон не является экстремальным природным явлением, потому сочетания характеристик его формы и движения могут быть описаны в виде классических многомерных распределений случайных величин, определяемых, например, по данным реанализа (ERA, NCEP/NCAR) за климатический интервал (не менее 30 лет). Однако экстремальный характер обуславливает сочетание параметров формы и движения синтетического циклона с заданной траекторией, что в целом и приводит к возникновению нагонной волны и наводнения в Санкт-Петербурге.

На основе синтетического циклона по полю давления, с использованием методики [3], определяется геострофический и далее — приводный ветер над Балтийским морем, на основе которого по гидродинамической модели (в данном исследовании применена модель BSM-2010) рассчитываются нагонная волна и ход уровня в наводнении. Таким образом, с точки зрения оперативной эксплуатации, синтетические поля давления и ветра заменяют собой штатный метеорологический прогноз, используемый в системе предотвращения угрозы наводнений. На рисунке приведены результаты реконструкции экстремальных наводнений в Санкт-Петербурге: *a* — пример синтетического циклона, *b* — изменение уровня воды (*h*) в синтетическом наводнении (давление в центре 960 гПа; *1* — скорость 40 км/ч, *2* — 30 км/ч, *3* — 45 км/ч, *4* — 40 км/ч, поворот 15° к югу, лаг 4 часа), *в* — наводнение, возможное один раз в сто лет, с оценкой вариабельности до 10 000 лет.

Предложенный метод может использоваться для оценки чувствительности методов и моделей, применяемых в системе предотвращения угрозы наводнений Санкт-Петербурга, к локальным изменениям метеорологических условий. Для этого синтетический циклон строится не на основе вектора параметров заданной повторяемости, а на основе какого-либо ретроспективного наводнения, для которого определяются траектория циклона и его параметры, например, с использованием данных метеопрогнозов (HIRLAM). Далее рассматривается возможность изменения одного или нескольких параметров циклона в различные моменты времени, с оценкой, например, устойчивости результатов при вариациях локальных ветров, которые невозможно отразить в региональной прогностической модели. При этом экстремальность самого природного явления трактуется исходя из величины отклонения от исходного наводнения. Например, на рисунке *в* приведена расчетная оценка хода уровня в наводнении, возможном раз в сто лет, а интервальные оценки вокруг нее соответствуют изменчивости характеристик синоптической ситуации, отражающей возможность возникновения наводнений повторяемостью до 1 раз в 10 000 лет (верхняя огибающая графика).

Таким образом, предложенный метод реконструкции экстремальных природных явлений редкой повторяемости, апробированный на наводнениях в Санкт-Петербурге, может быть использован для повышения эффективности функционирования систем оперативного прогнозирования и противодействия последствиям экстремальных природных явлений. Это достигается как за счет повышения надежности самой системы (настройка системы на

синтетических данных, нагрузочное тестирование и пр.), так и за счет обучения персонала действиям в ситуациях, описываемых реалистичными сценариями.



Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по договору № 14.Z56.14.6547-МК от 3 февраля 2014 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухановский А. В., Рожков В. А. Невские наводнения редкой повторяемости // Изв. РГО. 1999. Т. 131, вып. 3. С. 42—48.
2. Померанец К. С. Наводнения в Петербурге 1703—1997. СПб: Балтрус-бук, 1998.
3. Бухановский А. В., Лопатухин Л. И., Иванов С. В. Подходы, опыт и некоторые результаты исследований волнового климата океанов и морей. I. Постановка задачи и входные данные // Вестн. СПбГУ, сер. 7. 2005. Вып. 3. С. 62—74.

#### Сведения об авторах

**Сергей Владимирович Иванов**

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, Научно-исследовательский институт наукоемких компьютерных технологий; Санкт-Петербург; E-mail: sergei.v.ivanov@gmail.com

**Александр Александрович Вишератин**

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра высокопроизводительных вычислений, Санкт-Петербург

**Денис Александрович Насонов**

— Университет ИТМО, кафедра высокопроизводительных вычислений, Санкт-Петербург; преподаватель

**Александр Валерьевич Бухановский**

— д-р техн. наук; Университет ИТМО, Научно-исследовательский институт наукоемких компьютерных технологий; Санкт-Петербург; директор НИИ НКТ; E-mail: avb\_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
высокопроизводительных вычислений

Поступила в редакцию  
20.11.14 г.