

С. В. МОСТАМАНДИ, Д. А. НАСОНОВ, А. А. КАЛЮЖНАЯ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

### АНСАМБЛЕВЫЕ ПРОГНОЗЫ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЕ CLAVIRE

Рассмотрены особенности применения среды CLAVIRE в задачах ансамблевого прогноза экстремальных гидрометеорологических явлений применительно к наводнениям в Санкт-Петербурге.

*Ключевые слова:* ансамблевый прогноз, ансамблевый фильтр Калмана, чувствительность прогнозов, распределенные вычисления, наводнения.

Оперативное прогнозирование гидрометеорологических процессов связано с проблемой учета неопределенности и неполноты исходных данных, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на точности прогнозов и их заблаговременности. Применительно к экстремальным явлениям проблема усугубляется вследствие их редкой повторяемости, что не позволяет в полной мере воспользоваться ретроспективными данными для настройки прогностических моделей. Отчасти снизить влияние неопределенности можно с помощью процедуры оперативного усвоения данных наблюдений в моделях, однако качество усвоения зависит от того, насколько полно в данной процедуре используются априорные знания о поведении модели в различных ситуациях. Для получения этих знаний могут быть использованы разного рода адаптивные механизмы, основанные на уточнении процедуры усвоения по ходу поступления новой информации. Однако при прогнозировании экстремальных явлений (например, наводнений в Санкт-Петербурге [1]) для такой настройки требуется несколько лет оперативной эксплуатации. Другой подход заключается в использовании результатов непрерывных гидродинамических расчетов за несколько десятков лет. Его эффективность зависит от выбора климатического интервала; в частности, он применим только при стационарной межгодовой изменчивости моделируемого гидрометеорологического явления.

Альтернативой рассмотренным подходам является использование ансамблевых методов, в рамках которых влияние неопределенности на точность прогнозов исследуется непосредственно в оперативном режиме путем искусственного внесения стохастической изменчивости в исходные данные, граничные условия и параметры модели. Существуют различные варианты применения ансамблевых методов прогноза:

— интервальное оценивание прогнозов с заданной заблаговременностью для определения меры риска при принятии решений по прогностическим данным;

— определение ковариационных характеристик в процедуре усвоения на основе ансамблевого фильтра Калмана [2];

— изучение чувствительности прогностических моделей к изменению настроечных параметров при диагностических расчетах.

Практическая реализация ансамблевых методов прогноза связана с выполнением большого количества одинаковых расчетов при различных входных данных; при этом каждый расчет, требующий численного интегрирования системы уравнений аэрогидродинамики, достаточно ресурсоемок. При этом в ходе выполнения отдельных расчетов не требуется синхронизация; незавершение какого-либо расчета не является критическим для выполнения всей процедуры. Поэтому для такого рода задач целесообразно использовать не традиционные суперкомпьютерные системы высокой производительности, а проблемно-ориентированные среды распределенных вычислений, автоматизирующие построение композитных приложений, распределение заданий, балансировку нагрузки и сбор результатов.

В настоящей работе обсуждается опыт выполнения ансамблевых прогнозов с использованием среды CLAVIRE (CLOUD Applications VIRTUAL Environment) применительно к наводнениям в Санкт-Петербурге. Композитное приложение для выполнения прогнозов включает следующие прикладные сервисы:

— гидродинамическая спектральная модель морского волнения SWAN, необходимая для определения коэффициента трения водной поверхности, отражающего интенсивность передачи энергии от атмосферы водным массам;

— гидродинамическая баротропная модель течений и уровня Балтийского моря BSM, по которой выполняется прогноз уровня в Санкт-Петербурге;

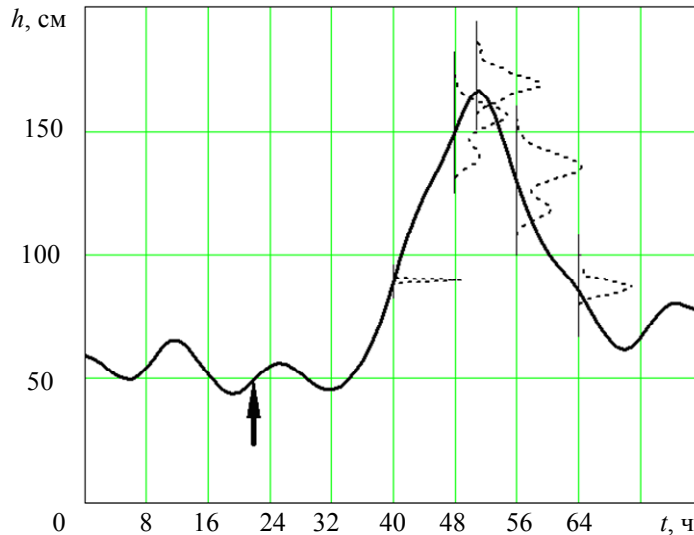
— модуль усвоения данных измерений уровня моря в модели BSM, основанный на редуцированном фильтре Калмана.

Выполнение композитного приложения требует параллельного запуска модели BSM с усвоением и без усвоения данных измерений; на основе сопоставления результатов расчетов выполняется корректировка ошибки прогноза на последующем временном шаге. В качестве входных данных используется метеорологический прогноз HIRLAM [3], граничные условия учитывают водообмен через Датские проливы и сток реки Нева.

При выполнении ансамблевого прогноза наводнения ситуации необходимо использовать временную предысторию расчетов; в зависимости от источника неопределенности (ветер, речной сток, водообмен и пр.) ансамбль строится или по отдельным сервисам из списка выше, или непосредственно по всей цепочке. При этом в среде CLAVIRE формируется очередь из независимых заданий, которые распределяются по целевым системам по мере освобождения ресурсов. Для этого на каждой из целевых систем должны быть установлены все или некоторые из перечисленных выше моделей; они регистрируются в соответствующей базе ресурсов и сервисов распределенной среды. Наличие одного и того же набора сервисов на всех целевых системах не является обязательным; это влияет только на общее время выполнения расчетов, поскольку обмен данными между шагами композитного приложения выполняется через централизованное хранилище.

В качестве иллюстрации на рисунке приведен ансамблевый прогноз наводнения 14 ноября 2008 г. (за 30 часов до наступления пика) в пункте Горный институт, выполненный по ретроспективным данным. Начало ансамблевого прогноза отмечено стрелкой. При построении ансамбля предполагалось, что прогностические данные по ветру в восточной части Финского залива имеют ошибку со среднеквадратичным отклонением 2 м/с. На рисунке приведен детерминированный прогноз на 48 часов вперед, а также ядерные оценки распределений хода уровня для различной заблаговременности. Видно, что ошибки в прогнозе ветра на локальной акватории могут приводить к вариациям уровня на 30—40 см; при этом наибольший разброс наблюдается на подъеме и спаде уровня; т.е. более чувствителен к неопределенности в

исходных данных прогноз скорости наступления наводнения, чем его пика. Экспериментальные исследования производительности композитного приложения, используемого для получения результатов на рисунке, показали ускорение вычислений (за счет распараллеливания в распределенной среде и в рамках общей памяти отдельных целевых систем) в 45 раз. Накладные расходы, вносимые CLAVIRE, не превышают 0,3 %.



Работа выполнена в рамках проектов по реализации Постановлений № 218 и 220 Правительства Российской Федерации при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.“.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухановский А. В., Рожков В. А. Невские наводнения редкой повторяемости // Изв. РГО. 1999. Т. 131, вып. 3. С. 42—48.
2. Mourre B. et al. Assimilation of sea level data over continental shelves: an ensemble method for the exploration of model errors due to uncertainties in bathymetry // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2004. Vol. 38, Iss. 2. P. 93—121.
3. HIRLAM homepage [Электронный ресурс]: <<http://hirlam.org/>>.

#### Сведения об авторах

- Мохаммад Сулейман Мостаманди** — НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; старший научный сотрудник;  
E-mail: [suleiman.mostamandy@gmail.com](mailto:suleiman.mostamandy@gmail.com)
- Денис Александрович Насонов** — НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; младший научный сотрудник;  
E-mail: [denis.nasonov@gmail.com](mailto:denis.nasonov@gmail.com)
- Анна Владимировна Калюжная** — студентка; Санкт-Петербургский Государственный университет;  
E-mail: [kalyuzhnaya.ann@gmail.com](mailto:kalyuzhnaya.ann@gmail.com)
- Александр Валерьевич Бухановский** — д-р техн. наук, профессор; НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; директор;  
E-mail: [avb\\_mail@mail.ru](mailto:avb_mail@mail.ru)

Рекомендована НИИ НКТ

Поступила в редакцию  
15.05.11 г.