

А. В. БУХАНОВСКИЙ, А. Н. ЖИТНИКОВ, С. Г. ПЕТРОСЯН, П. М. А. СЛООТ

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСТРЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ УГРОЗЫ НАВОДНЕНИЙ

Рассматриваются вопросы применения технологий экстренных вычислений при организации и разработке систем предотвращения угрозы наводнений на примере Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: экстренные вычисления, поддержка принятия решений, суперкомпьютеры, Грид, прогноз уровня и течений, усвоение данных.

Эффективность предотвращения природных и техногенных катастроф зависит не только от возможности их заблаговременного предсказания, но и от выработки адекватных и своевременных мер, позволяющих минимизировать возможный ущерб. Поэтому в современных технологиях активно используется ресурсоемкое компьютерное моделирование различных сценариев действий в экстремальных ситуациях, что дает возможность исследовать различные варианты эволюции событий, приводящих к неблагоприятным последствиям. Процесс поддержки принятия решений сводится к определению наиболее вероятных сценариев развития ситуации и выявлению „узких мест“, критичных с точки зрения дальнейшего негативного влияния на ее общий исход [1]. Это дает возможность рассматривать формирование мер противодействия, позволяющих уменьшить или вообще устранить последствия экстремальной ситуации, как решение задачи оптимизации.

В целом при таком подходе высокая вычислительная сложность компьютерного моделирования отдельных сценариев совмещается с жестко заданным сроком получения результатов расчетов, напрямую связанным с допустимым временем принятия решений. При этом основной проблемой является существенная неоднородность вычислительных задач, поскольку, в зависимости от развития ситуации, для реализации того или иного сценария могут быть использованы различные вычислительные приложения, предъявляющие различные требования к вычислительным ресурсам и организации данных. Преодолеть эту проблему позволяет специфическое направление суперкомпьютерных технологий — технологии экстренных вычислений (ЭВ) [2].

В настоящей статье рассматриваются аспекты применения технологий ЭВ для организации системы предотвращения угрозы наводнений в Санкт-Петербурге.

Концепция экстренных вычислений. Под ЭВ понимается процесс организации высокопроизводительных вычислений в целях компьютерного моделирования экстремальных ситуаций для поддержки принятия решений в условиях ограниченного времени решений. Основная задача ЭВ состоит в том, чтобы динамически сформировать и контролировать пул

ресурсов (данных, прикладных пакетов, вычислительных мощностей) в распределенной среде, достаточный для решения задачи пользователя (в форме задаваемого им сценария) за определенное время. При этом пользователь не участвует в процессе управления данными ресурсами: оно осуществляется низкоуровневыми средствами ЭВ; после завершения задачи используемые ресурсы освобождаются автоматически.

По сравнению с традиционными технологиями высокопроизводительных вычислений для компьютерного моделирования сложных систем, технологии ЭВ имеют свои специфические особенности.

— В системах ЭВ наравне с вычислительными сервисами используются сервисы доступа к данным измерений в режиме реального времени (интерфейсы датчиков, контроллеров технических средств и пр.). В процессе вычислений производится согласование данных измерений и результатов расчетов (например, данные ассимилируются в моделях [3]).

— Вычислительные процессы в рамках модели ЭВ обычно описываются в форме разветвленных (в соответствии с деревом возможных рисков) сценариев развития событий, представляемых в форме потоков заданий (*workflow*, *WF*).

— Задача оптимизации нагрузки в распределенной среде в рамках концепции ЭВ может быть представлена следующим образом: сформировать такой пул ресурсов, который обеспечивал бы решение задачи за время не более заданного. Это требует анализа вариантов распараллеливания вычислений на всех уровнях иерархии (от ядер и процессоров до выбора отдельных целевых систем в распределенной среде).

Как следствие, в технологиях ЭВ отражен ряд противоречивых требований к организации вычислительной инфраструктуры для поддержки принятия решений в экстремальной ситуации [4]. С одной стороны, ограничения по допустимому времени принятия решения требуют использования суперкомпьютеров для реализации отдельных вычислительных задач, в то время как задача консолидации разнородных вычислительных приложений в составе сценариев приводит к необходимости применения технологий класса Грид. Аналогично — необходимость выделения динамических ресурсов по требованию ассоциируется с архитектурой облачных вычислений, а обеспечение надежности получения результата в срок требует резервирования ресурсов в монопольной распределенной системе с географически разнесенными узлами. Поскольку потребность в экстренных вычислениях может возникать достаточно редко (по мере появления экстремальных ситуаций), система ЭВ по сути является динамической: она не располагает собственной выделенной вычислительной инфраструктурой, однако обладает механизмами для того, чтобы обеспечить приоритет исполнения своих задач в распределенных средах общего назначения.

Спецификой ЭВ также является интерактивность процесса поддержки принятия решений, в котором могут участвовать несколько лиц, принимающих решения (ЛПР), имеющих доступ к одним и тем же инструментальным средствам. При этом ЛПР могут самостоятельно формулировать и исследовать разные сценарии развития ситуации в процессе обоснования принимаемого решения. Как следствие, процесс поддержки принятия решений может быть представлен в виде последовательности *сессий* [5]. Для эффективной организации процесса исполнения сессий необходимо наличие гибких механизмов управления вычислительными ресурсами. Они должны учитывать, с одной стороны, специфику самой вычислительной инфраструктуры, а с другой — различные приоритеты решаемых задач, связанные как с организацией процесса принятия решений, так и с предметной областью. Таким образом, решение задач ЭВ не может быть реализовано в полной мере в рамках программно-аппаратного обеспечения высокопроизводительных вычислений широкого профиля и требует развития специфических технологий.

Предотвращение наводнений как задача экстренных вычислений. В настоящее время технологии ЭВ находят свое применение в системах раннего предупреждения о

природных катастрофах [6], в том числе связанных с наводнениями, вызванными воздействием длинных волн (цунами и штормовых нагонов). Однако предсказание волн цунами осложнено неопределенностью локализации землетрясения, что в ряде случаев не позволяет обеспечить требуемую заблаговременность даже при использовании ЭВ с практически неограниченным доступом к вычислительным ресурсам. Напротив, возникновение длинных волн синоптической природы (морских нагонов) во многом определяется физико-географическими особенностями конкретных географических районов, что в общем случае позволяет прогнозировать их в оперативном режиме. Такие наводнения достаточно распространены в мире: им подвержены мелководные побережья Балтийского, Северного, Адриатического морей, Мексиканского и Бенгальского заливов, некоторых крупных озер. В России печальную известность снискали нагонные наводнения в Санкт-Петербурге — самые грозные стихийные бедствия города со дня его основания. По сути дела, история Санкт-Петербурга — это история борьбы с наводнениями [7]. Только во время царствования Петра I с 1703 по 1725 г. их было одиннадцать. В 1824 г. уровень воды достиг самой высокой точки в истории Санкт-Петербурга (410 см) — в городе были разрушены 462 дома и 3681 — поврежден. В 1924 г. водой, поднявшейся на 369 см, было затоплено более половины города, снесено 19 мостов, повреждено свыше 5000 домов, выброшено на берег 95 судов.

С учетом тенденций развития городской застройки для противодействия наводнениям уже в 1982 г. началось строительство комплекса защитных сооружений (КЗС). Он расположен в 25 км западнее Санкт-Петербурга; сооружения рассчитаны на подъем воды в Финском заливе до 5 метров. КЗС представляет собой систему каменно-земляных дамб, в теле которых находятся шесть водопропускных и два судопропускных сооружения, оборудованные затворами, которые могут закрываться при угрозе наводнения. Несмотря на то что КЗС сам по себе ограничивает распространение нагонной волны в Невской губе, в полной мере предотвращение наводнения может быть обеспечено только за счет своевременного закрытия затворов судо- и водопропускных сооружений. Поскольку темпы роста уровня воды при наводненческих ситуациях зависят от совокупности природных факторов, оптимальное время и порядок закрытия затворов невозможно указать заранее, исходя только из прогностической информации. Для решения задачи информационной поддержки процессов управления КЗС в условиях наводненческой ситуации в настоящее время разработана и внедрена Система предупреждения угрозы наводнений (СПУН), реализующая элементы концепции ЭВ. Ее основной задачей является построение оптимального плана маневрирования затворами КЗС, который должен обеспечивать наименьшее время нахождения затворов КЗС в закрытом состоянии, достигая при этом полного предотвращения наводнения (уровень воды не поднимается выше 160 см). Заблаговременно закрыть затворы по первым признакам надвигающейся наводненческой ситуации тоже не представляется возможным, поскольку в этом случае ограничивается сток Невы (в свою очередь, это также может привести к подтоплению города). Кроме того, длительное нахождение всех затворов КЗС в закрытом состоянии ограничивает деятельность морского порта Санкт-Петербурга.

Система предотвращения угрозы наводнений. В основе функционирования СПУН заложена технология оперативного прогноза наводнений в Санкт-Петербурге. В СПУН используется численная модель динамики водных масс Балтийского моря, воспроизводящая синоптическую изменчивость уровня и морских течений; географические особенности региона позволяют ограничиться двумерной моделью (приближение „мелкой воды“) в криволинейной системе координат. В качестве входных данных для модели динамики водных масс применяются данные метеорологических прогнозов атмосферного давления и ветра, а также водообмена Балтийского и Северного морей через Датские проливы. Модель функционирует в оперативном режиме совместно с моделью синоптической изменчивости морского волнения на основе уравнения баланса волновой энергии в спектральной форме. Информация о

морском волнении необходима не только для определения нагрузок на технические устройства КЗС, но и при использовании в составе модели динамики водных масс с целью уточнения механизма воздействия ветра на водную поверхность. В качестве параметрической характеристики расчетной акватории также используется прогноз ледовой обстановки.

Принципиальной составляющей технологии оперативного прогноза является процедура оперативного усвоения данных наблюдений за гидрометеорологическими процессами в Финском заливе, позволяющая на 30—70 % (в зависимости от заблаговременности) повысить качество прогностических оценок уровня. При использовании автоматизированной системы гидрометеорологических наблюдений в Восточной части Финского залива, входящей в состав КЗС, учитывая региональную специфику, возможно ограничиться локальной процедурой ассимиляции, корректирующей профиль распространяющейся нагонной волны на акватории Финского залива.

На рис. 1 приведен пример корректировки модельных расчетов уровня (h) в п. Горный институт за счет усвоения данных, на примере наводнения 16 ноября 2008 г. в Санкт-Петербурге, т.е. ретроспективный прогноз (1 — результаты измерений, 2 — низкочастотная составляющая ошибки, 3 — прогноз с использованием ассимиляции только по пространству, 4 — прогноз с использованием ассимиляции по пространству и времени). Видно, что усвоение данных только в текущий момент времени не позволяет произвести корректировку поведения модели, в частности, модельное решение в течение 6 ч возвращается на прежнюю траекторию, а на графике хода уровня возникают осцилляции. С учетом временной предыстории в процедуре усвоения ход уровня становится более гладким, наблюдается хорошее совпадение расчетов и измерений, ошибка не превышает 10—15 см.

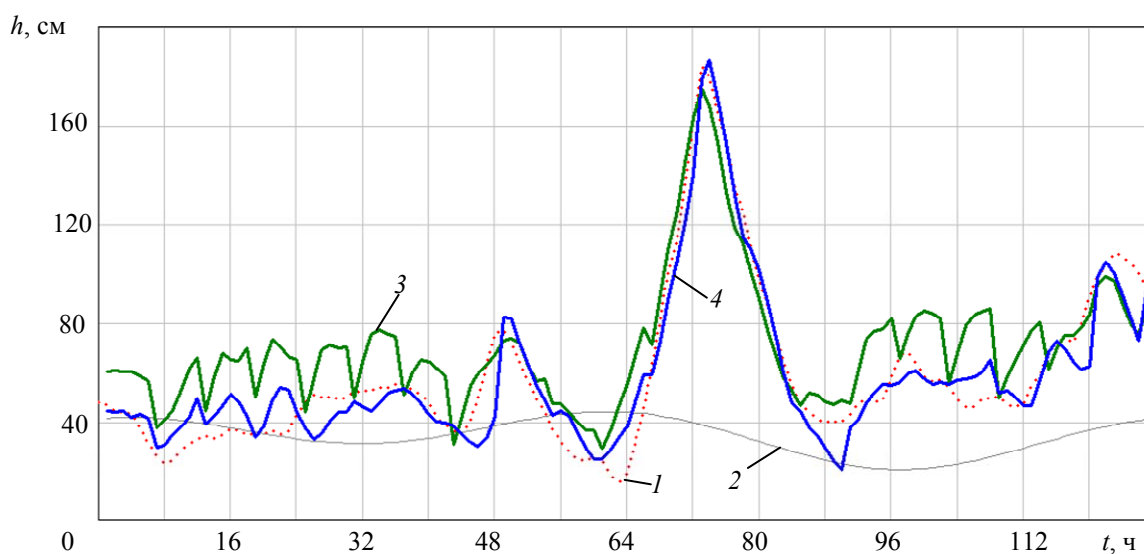


Рис. 1

При создании СПУН отдельное внимание уделяется обеспечению надежности ее функционирования, достигаемой как резервированием вычислительных ресурсов в распределенной системе, так и функциональным резервированием отдельных задач. В частности, технология допускает использование различных (альтернативных) источников метеорологических прогнозов (как отечественных, так и зарубежных), а также корректировку влияния отсутствующих источников входных данных посредством пространственно-временного усвоения текущих наблюдений. Для контроля качества прогностических данных используется альтернативная технология краткосрочных прогнозов уровня на основе вероятностной модели.

Оперативный прогноз уровня воды вырабатывается каждые 6 часов на 48 часов вперед; он лежит в основе функционирования СПУН в целом. В том случае, когда прогнозируется

наступление наводнения, система исходя из данных прогноза формирует план маневрирования затворами КЗС. При этом решается обратная задача: определяется время закрытия затворов КЗС при условии, чтобы за время нахождения затворов в закрытом состоянии не произошло подтопление города за счет ограничения стока Невы; оперативные данные измерений речного стока также доступны в составе СПУН. Для построения плана требуется учет локальных гидродинамических эффектов, связанных с тем, что процедура закрытия затворов КЗС в целом занимает несколько часов; при этом возможно образование дополнительных волновых движений в акватории Невской губы с амплитудой до нескольких десятков сантиметров. Расчет и анализ плана выполняются с учетом неопределенности прогностических оценок на основе интервального подхода.

На рис. 2 приведена концептуальная схема принятия решений при использовании СПУН (СППР — система поддержки принятия решений).

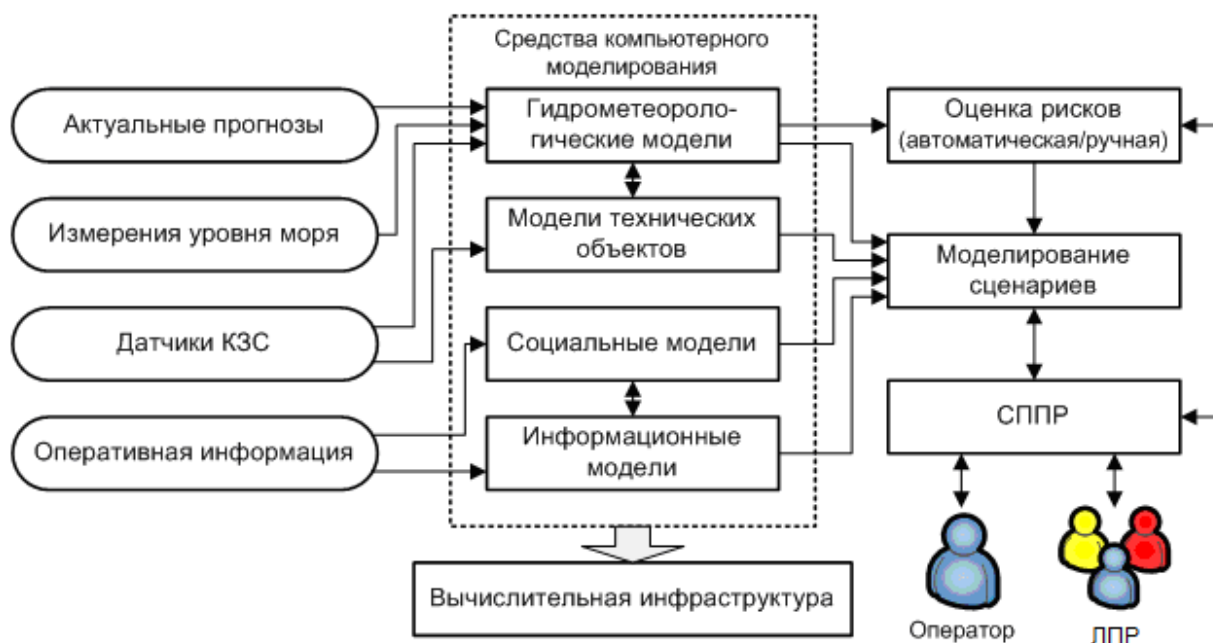


Рис. 2

СПУН в полной мере реализует функции интерактивной советующей системы: несмотря на то что она автоматически формирует непротиворечивый план, пригодный для исполнения КЗС, решение по маневрированию затворами принимает и воплощает диспетчер КЗС (как ЛПР) на основе интегральной информации о состоянии объекта и окружающей среды. Она включает в себя данные альтернативных источников о гидрометеорологической обстановке, сведения о текущем состоянии отдельных технических устройств КЗС и нахождении судов на акватории КЗС, информацию, поступающую от оперативных служб города. В ряде случаев план, предлагаемый системой, может быть отклонен ЛПР. В такой ситуации информационная поддержка ЛПР осуществляется на основе ручного формирования, расчета и сопоставления различных модельных сценариев развития ситуации, с оценкой соответствующих рисков для КЗС и города в целом, для этого применяются технологии ЭВ. В перспективе такой подход требует учитывать не только технические характеристики исполнимости плана, но и специфические аспекты взаимодействия системы „природная среда—КЗС—город“. К ним относятся, в частности, модели развития затопления городских территорий, сценарии, позволяющие координировать действия служб оперативного реагирования, а также модели развития экологической катастрофы.

Оценка ресурсоемкости вычислений в СПУН. В целом расчетные компоненты в составе СПУН неоднородны по требованиям к вычислительным ресурсам, периодичности применения и ограничениям на допустимое время получения результата. Например, объем вычислений, необходимых для оперативного прогноза уровня на 48 часов, составляет всего 9 ТФлоп, с использованием пространственно-временного усвоения — 20 ТФлоп. Поскольку время принятия решения в данном случае ограничивается десятками минут (учитывая, что заблаговременность прогноза — 48 часов), для решения данной задачи не требуются специализированные суперкомпьютерные технологии. Однако при построении оптимального плана (решение обратной задачи) объем вычислений составляет уже около 260 ТФлоп. В том случае, когда ЛПР вручную исследуют и сопоставляют различные сценарии оперирования затворами КЗС и время принятия решений составляет минуты, без использования суперкомпьютерных технологий обойтись не представляется возможным. Отдельные требования к ресурсам предъявляют перспективные компоненты, использование которых связано с анализом альтернативных источников данных: например, модель регионального метеорологического прогноза (320 ТФлоп) или процедура ансамблевого пространственно-временного усвоения данных (650 ТФлоп). Учитывая их спорадическое использование, обеспечивать такой компонент постоянно функционирующим вычислительным ресурсом нецелесообразно; по-видимому, оптимален в данной ситуации хостинг инфраструктуры, например, в рамках одной из моделей облачных вычислений. Таким образом, это отражает современные тенденции эволюции систем поддержки принятия решений: для относительно сложных, но локализованных объектов допустимо использовать неспецифические вычислительные платформы; однако учет множественных взаимосвязей объекта с внешней средой делает необходимым применение ЭВ как разновидности суперкомпьютерных технологий.

Заключение. Использование технологий ЭВ открывает новые возможности для развития и улучшения существующей системы предотвращения угрозы наводнений в Санкт-Петербурге. Это обеспечивается как экстенсивными факторами (увеличение точности прогнозов, повышение эффективности планов маневрирования затворами), так и расширением состава информационной и интеллектуальной поддержки ЛПР, включая оценку степени неопределенности оценки текущей ситуации и возможность моделирования различных сценариев развития неблагоприятных последствий. В целом такой подход может быть без потери общности перенесен на другие технические объекты аналогичного назначения.

Работа выполнена в рамках проектов по реализации Постановлений № 218 и 220 Правительства Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / Под ред. Ю. И. Нечаева. СПб: ГМТУ, 2001. 352 с.
2. Beckman P., Nadella S., Trebon N., Beschastnikh I. SPRUCE: A System for Supporting Urgent High-Performance Computing // Grid-Based Problem Solving Environments. IFIP 2.5 Conf. Proc. Springer Press. P. 295—316.
3. Gill M., Malanotte-Rizzoli P. Data assimilation in meteorology and oceanography // Adv. Geophys. 1991. Vol. 33. P. 141 — 266.
4. Cencerrado A., Senar M.Á., Cortés A. Support for Urgent Computing Based on Resource Virtualization // Lecture Notes in Computer Sci. 2009. Vol. 5544/2009. P. 227—236.
5. Wolski R., Nurmi D., Brevik J., Obertelli G. Using Batch Controlled Resources to Support Urgent Computing // Urgent Computing Workshop. 2007 [Электронный ресурс]: <<http://spruce.teragrid.org/workshop/talks/Wolski.pdf>>.
6. Allen G., Bogden P., Kosar T., Kulshrestha A. et al. Cyberinfrastructure for Coastal Hazard Prediction // CTWatch Quarterly. Urgent Computing: Exploring Supercomputing's New Role. 2008. Vol. 4, N 1. P. 17—26.
7. Померанец К. С. Три века петербургских наводнений. СПб: Искусство-СПб, 2005. 142 с.

Сведения об авторах

- 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
- Андрей Николаевич Житников** — ЗАО „Бизнес компьютер центр“, Департамент консалтинговых и программных проектов, Санкт-Петербург; заместитель директора;
E-mail: azhitnikov@bcc.ru
- Сергей Георгиевич Петросян** — ЗАО „Бизнес компьютер центр“, Департамент консалтинговых и программных проектов, Санкт-Петербург; руководитель проекта;
E-mail: spetrosyan@bcc.ru
- Петрус Мария Арнольдус Слоот** — доктор философии в области компьютерных наук, профессор; Университет города Амстердам; E-mail: p.m.a.sloot@uva.nl

Рекомендована НИИ НКТ

Поступила в редакцию
15.05.11 г.