

УДК: 004.02

Интерактивный графический инструментарий глобального вычислительного эксперимента в службе морских оперативных прогнозов

**А. В. Богданов^а, Я. А. Дегтярева, Е. А. Захарчук, Н. А. Тихонова,
В. Р. Фукс, В. Н. Храмушин**

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9

E-mail: ^аbogdanov@csa.ru

Получено 11 февраля 2015 г.

Эффективность и полнота численного моделирования в океанологии и гидрометеорологии всецело обуславливаются алгоритмическими особенностями построения интерактивного вычислительного эксперимента в масштабах Мирового океана с адаптивным покрытием закрытых морей и прибрежных акваторий уточненными математическими моделями, с возможностью программного распараллеливания уточняющих расчетов вблизи конкретных — защищаемых участков морского побережья. Важной составляющей исследований представляются методы непрерывной графической визуализации в ходе вычислений, в том числе осуществляемой в параллельных процессах с общей оперативной памятью или по контрольным точкам на внешних носителях. Результаты вычислительных экспериментов используются в описании гидродинамических процессов вблизи побережья, учет которых важен в организации морских служб контроля и прогноза опасных морских явлений.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, интерактивные графические комплексы, инженерные системы, океанология, гидрометеорология, тензорная математика

Исследования выполняются при поддержке грантами РФФИ (№ 13-07-00747), СПбГУ (№ 9.38.674.2013, № 0.37.155.2014, № 18.37.140.2014) и «Комплексная программа ДВО РАН «Дальний Восток» (№ 15.3312-III-CO-08-023), с использованием вычислительной техники Ресурсного центра «Вычислительный центр СПбГУ».

Interactive graphical toolkit global computer simulations in marine service operational forecasts

A. V. Bogdanov, Ya. A. Degtyreva, E. A. Zakharchuk, N. A. Tikhonova, V. R. Foux,
V. N. Khramushin

Saint-Petersburg state university, 7-9 Universitetskaya naberezhnaya, St. Petersburg, 199034, Russia

Efficiency and completeness of the numerical simulation in oceanography and hydrometeorology are entirely determined by algorithmic features of the construction of an interactive computer simulations in the scale of the oceans with adaptive coated closed seas and coastal waters refined mathematical models, with the possibility of specifying software parallelization calculations near the concrete — the protected areas of the sea coast. An important component of the research is continuous graphical visualization techniques in the course of calculations, including those undertaken in parallel processes with shared RAM or test points on the external media. The results of computational experiments are used in the description of hydrodynamic processes near the coast, which is important in keeping the organization of sea control services and forecasting marine hazards.

Keywords: computational simulation, interactive graphics systems, engineering systems, oceanography, hydrometeorology, tensor mathematics

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 641–648 (Russian).

Введение

Современные информационно-вычислительные системы вполне удовлетворяют минимальным требованиям по производительности и способны оперировать глобальными объемами общегеографических, океанографических и гидрометеорологических данных для вовлечения прямых вычислительных экспериментов в регламентную работу морских оперативных служб. Актуальной задачей видится реализация контроля текущего состояния с обеспечением своевременных прогнозов опасных морских явлений, прибрежных экстремальных течений и нетиповых астрономических приливов, штормовых нагонов и сейсмических цунами, численное моделирование которых основано на вовлечении динамических граничных условий по огромным океанским акваториям, в том числе с использованием различных эмпирических источников потенциальной опасности в удаленных районах Мирового океана.

Новизна исследований определяется возможностью анализа алгоритмических особенностей интерактивного вычислительного эксперимента для моделирования длинноволновых процессов в масштабах Мирового океана и частично закрытых морей, в том числе под управляемым распараллеливанием уточняющих расчетов вблизи конкретных участков побережья. Графическая визуализация служит средством контроля качества моделирования гидродинамических процессов в подобластях с плохо обусловленными аппроксимационными критериями и востребуется в оценках вычислительной эффективности при оптимизации физической постановки задачи, в том числе с должным учетом архитектурных особенностей вычислительной техники. С этой целью рассматриваются особенности функциональной среды прямых вычислительных экспериментов в гидромеханике, формулируются оптимальные подходы к реализации объектно ориентированной среды программирования, включая согласованные методы построения числовых объектов и операций с явным или функциональным (рекурсивным) описанием больших сеточных областей и массивов общегеографических исходных данных.

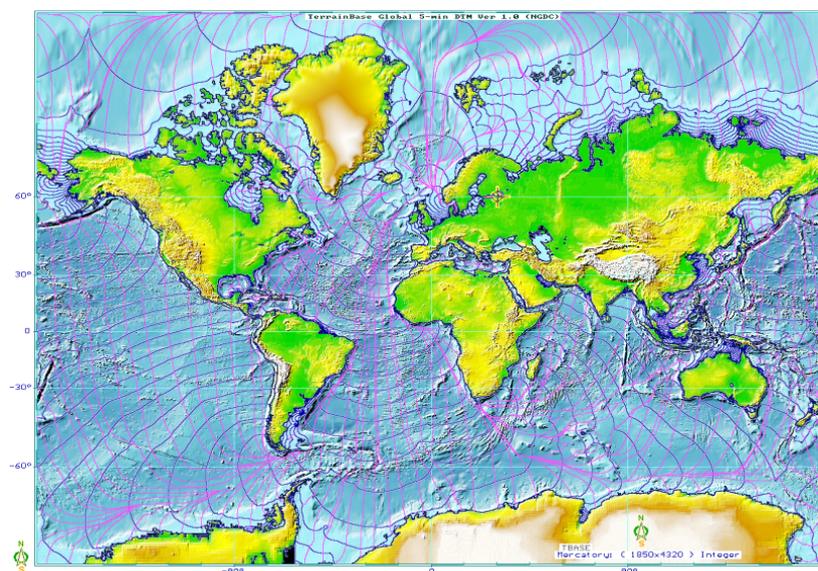


Рис. 1. Цифровой массив высот и глубин по Земному шару в меркаторской проекции с шагом 5 морских миль на средней приведенной широте. Океан покрыт сеткой ежечасных изохрон и лучей для распространения длинноволнового импульса со стороны г. Санкт-Петербурга

Приведенная на рис. 1 цифровая батиметрическая модель Земного шара адаптирована для глобального моделирования длинноволновых процессов в Мировом океане, в том числе под динамическим воздействием геопотенциала Луны и Солнца, с учетом придонного трения, сферичности и вращения Земли [Храмушин, 2010], при этом скорость вычислений, на виртуальной машине с графической станцией и восьмью CPU-Хеон по 3 ГГц, в два раза быстрее реального

времени. Формально резерв скорости необходим, к примеру, для дополнительного учета стратификации водных потоков или для включения в вычислительный эксперимент атмосферных циклонов и приводных ветров, по необходимости для приостановки расчетов с целью адаптации вычислений к иным внешним гидродинамическим воздействиям типа сейсмических цунами или подводных оползней и вулканов.

Вычислительная задача

Длинноволновая вычислительная модель представляется замечательным образцом обобщенной инженерной задачи для всестороннего изучения и освоения интерактивных графических комплексов при реализации совместных вычислительных экспериментов в гидромеханике океана и атмосферы, в которых распараллеливание алгоритмов по моделированию в масштабах всего Земного шара должно сочетаться с необходимостью параллельной отработки множества синхронных сценариев для прогнозного и уточняющего моделирования гидрофизических и гидродинамических процессов вблизи морского побережья, на акваториях рейдов и гаваней морских портов.

Исходная математическая модель в канонической форме (рис. 2, выражения (I) и (III)) представляется системой дифференциальных уравнений первого порядка [Храмушин, 2010], для которых возможно применение явных численных схем с разделением этапов решения по независимым физическим процессам. В алгоритмическом плане это означает возможность распараллеливания вычислительных операций вплоть до каждой отдельно взятой сеточной ячейки — частицы жидкости — и, соответственно, доступность сквозного контроля физического состояния моделируемой среды с целью динамического выбора адекватной математической, асимптотической или эвристической модели течения.

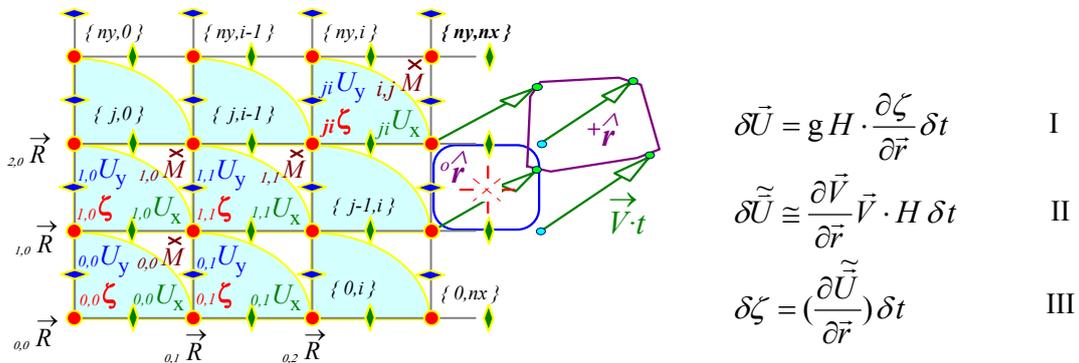


Рис. 2. Вычислительная схема континуально-корпускулярного представления длинноволновой модели динамики океана: U — вектор полного потока; H — глубина моря; ζ — отклонение уровня от равновесного положения; V — скорость смещения частицы относительно неподвижной сетки; R — вектор местоположения и r — тензор формы частицы; I — уравнение движения (внешнее воздействие); II — деформация крупной частицы жидкости (конвективность — интерполяция к исходным узлам); III — условие неразрывности (захват энергии движения)

Интерполяционный этап II (рис. 2) отвечает за большие смещения и деформации частиц жидкости и обычно не включается в длинноволновые вычислительные эксперименты. Вычислительная модель вполне может учитывать реальную высоту волны — для моделирования планового наката на пологом побережье, для чего должен усиливаться контроль сохранности частиц жидкости — корпускул на наклонной поверхности, наполняющих русла рек и растекающихся по пологим пляжам и др. В любом случае явные численные схемы не востребуют специальных регулярных расчетных сеток, и не приводят к необходимости задействования гигантских массивов оперативной памяти для порождения числовых матриц с заведомо плохой обусловленностью в подобластях с большими градиентами физических полей.

Вычислительная среда

Современное развитие систем дистанционного зондирования и телеметрического контроля состояния атмосферы и океана достигает минимально необходимого уровня информационной поддержки для контроля корректности и актуальности вычислительных экспериментов при непрерывном моделировании динамики океана, атмосферы и их взаимодействия в реальном масштабе времени.

Кинематика длинноволнового поля (рис. 1) показывает геометрическую соразмерность океанов и открытых акваторий, ограниченных лучевыми трубками между суточными и полусуточными изохронами. Это объясняет резонансное усиление лунно-солнечного геопотенциала в приливном отклике с 70 см до 12 м (Пенжинская губа Охотского моря) и более и служит обоснованием необходимости непрерывного численного моделирования приливного режима по всему Мировому океану в реальном времени, что, по крайней мере, обязательно востребуется в динамическом представлении граничных условий в вычислительных экспериментах с опасными морскими явлениями для локальных акваторий океана и отдельных участков побережья.

В явных численных схемах каждая расчетная ячейка-частица может обрабатываться по особым алгоритмическим правилам, например, в простейшем случае, для логического исключения из расчетов береговых или осушенных поверхностей и др. В программном комплексе Ani [Храмушин, 2010] обнаружено и задействовано важнейшее свойство прямых вычислительных моделей — это равнозначность физических уравнений движения (рис. 2, I) и неразрывности (рис. 2, II), для которых все внешние воздействия должны включаться в соответствии с концепцией половинных шагов во времени при разделении этапов моделирования по физическим процессам и столь же тщательно прописываться в условиях на свободных границах расчетных областей.

В вычислительной модели (рис. 2) плавно изменяются векторное поле полных потоков U и поле уровней моря ζ , при этом весовая функция — поле фазовых скоростей длинных волн $C = (g \cdot H)^{1/2}$ — является принципиально негладким и недифференцируемым. Это требует особого внимания при алгоритмической балансировке численных схем, что, в свою очередь, проявляется в результатах заметным дисперсионным выполаживанием (красным смещением) волновых процессов во времени, что в целом соответствует наблюдениям за естественным распространением длинных волн над неровным морским дном.

В реализации вычислительного эксперимента необходимо согласование аппроксимационных критериев по пространству и во времени. «Во времени» — это критерий устойчивости, превышение которого приводит к взрывному разрушению вычислительных процессов. Существующее противоречие разрешается увеличением шага сетки в акваториях с большими глубинами, что значительно повышает эффективность и скорость проведения вычислительного эксперимента без потери качества и точности моделируемых гидродинамических процессов. Нарушение критериев пространственных аппроксимаций связано с уменьшением длины моделируемой волны до размеров сеточных ячеек, отчего возникают неугасаемые точечные источники волн, влияющие на общий декремент затухания гидродинамических процессов во всей расчетной области, и практически необнаружимо в результатах вычислительных экспериментов в виде морграфных записей колебаний уровня моря и скоростей течений. Если в вычислительном эксперименте не задействуются гибридные алгоритмы для моделирования планового наката и вихревых течений на мелководьях, то обнаружение проблем с аппроксимационной гладкостью возможно лишь визуально, по графическому изображению скалярных полей уровня моря или векторных полей полных потоков скоростей течений.

Гидродинамические особенности проявления длинноволновой динамики моря вблизи побережья были выявлены в ходе проведения серии прямых вычислительных экспериментов. Результаты аналитических обобщений могут быть полезны в регламенте работы морских служб при выработке и обосновании оперативных предупреждений о проявлении потенциально опасных морских явлений. Проявление морских наводнений («эхо и реверберация» — в акустике)

у конкретных участков морского побережья более всего обуславливается этапами прохождения прогрессивных волн и возбуждения сопутствующих резонансных проявлений длинноволновых процессов в относительно мелководных шельфовых акваториях (рис. 3) и всецело зависящих от геометрических особенностей прибрежного рельефа морского дна.

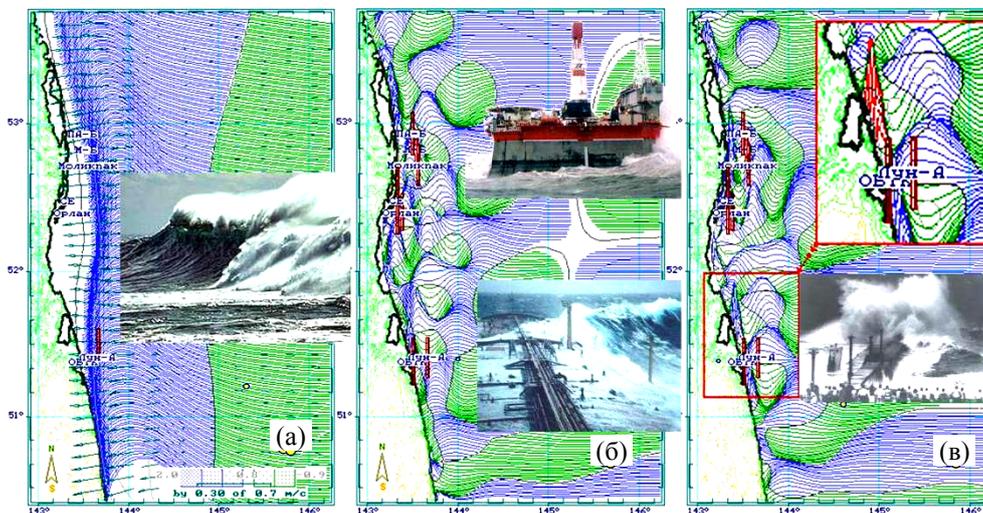


Рис. 3. Северо-восточный шельф острова Сахалин. Три типовых варианта трансформации длинных волн вблизи морского побережья: (а) — обрушение фронта первого вступления волны вблизи побережья, характерное для цунами; (б) — установившиеся колебания уровня моря под воздействием штормов или морской зыби; (в) — обрушение длиннопериодной морской волны на побережье в случае нарушения условий стационарности длинноволновых процессов на изобатах порядка 25–40 м

Если прибрежная акватория характеризуется монотонным наклоном морского дна, без каких-либо горизонтальных поверхностей и закрытых заливов, то это является условием отсутствия собственных длинноволновых колебаний вблизи такого побережья. Однако именно такие участки морского дна могут стать своеобразным проводником длинных волн с большой амплитудой до самого побережья, нерезонирующий «волновод» способен откачивать на себя длинноволновую энергию из близлежащих акваторий со значительным увеличением высоты падающей на берег прогрессивной волны (рис. 3в), с последующим рассеянием на прибрежных мелководьях и непосредственно на береговом уресе в виде высоких волновых групп.

Характер воздействия на побережье первых фронтов прогрессивных волн (цунами, рис. 3а) заметно отличается от постоянно существующих длинноволновых резонаторов в прибрежных мелководьях открытого моря (рис. 3б), зарождающихся под воздействием различных метеорологических факторов или вынужденных волновых колебаний, привносимых из удаленных штормовых акваторий. Многовековые геоморфологические процессы самостабилизируют собственные длинноволновые колебания вблизи побережья, однако если в штормовых условиях случается условно незначительное нарушение стандартного течения гидрофизических или гидрометеорологических процессов, то огромная энергия шельфовых колебаний уровня моря может быть перенаправлена в сторону побережья (рис. 3-с), что естественным образом послужит усиленному разрушению берегов и всей инженерной инфраструктуры, приведшей к нарушению стационарности, порождая опасные, но формально восстановительные процессы перестроения устойчивых состояний шельфовых резонансов в обширных прибрежных акваториях.

Аналогичные по характеру нестационарности наводнения могут вызываться после первого вступления одиночного или нетипичного фронта волны наводнения, что будет проявляться в форме подвижных пакетов волновых структур (*захваченной энергии*), перемещающихся строго вдоль побережья, и последовательно заливающего все пункты по маршруту следования.

Интенсивность длинноволновых процессов на морском шельфе и вызываемых ими морских наводнений на побережье в существенной степени зависит от гидродинамических условий

поддержания стабильности собственных длинноволновых колебаний уровня моря, проявление которых может быть с высокой достоверностью картировано по результатам серии длительных прямых вычислительных экспериментов.

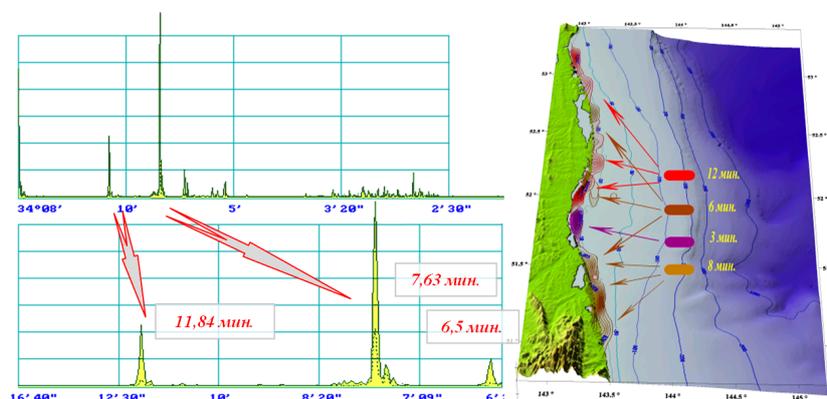


Рис. 4. Сахалинский шельф. Характерные периоды длинных волн, способных длительное время сохраняться или накапливаться на северо-восточном шельфе о-ва Сахалина. Существование прибрежных резонаторов принципиально подтверждается морскими экспедиционными измерениями

В прибрежных акваториях, и особенно в полузамкнутых бухтах и портовых гаванях, всегда присутствуют области со свойствами высокочастотных резонаторов, на которых аккумулируется энергия длинноволновых колебаний уровня моря на строго определенных периодах, определяемых ее топологическими особенностями. Своеобразные «волновые аккорды» или «полосовые спектры».

По рис. 4 отметим, что если пространственные экстремумы для собственных колебаний уровня моря находятся непосредственно вблизи побережья, то такой берег может быть признан небезопасным для строительства прибрежных инженерных сооружений. Если же на берег будет выходить узловая линия между пучностями стоячих волн, то у такого участка небезопасны строительство выносных причалов или организация якорных стоянок, даже в случае защищенности этих акваторий от прямого воздействия морской зыби и штормовых ветров. Такие заключения могут не учитываться только в одном случае — если по результатам серии вычислительных экспериментов доказываемая принципиальная невозможность зарождения интенсивных гидродинамических процессов с означенными периодами длинных волн.

В прямых вычислительных экспериментах выявляются аккорды собственных длинноволновых колебаний, отображающиеся во всех прилегающих пунктах регистрации уровня моря в форме стоячих волн, с понижением энергетического уровня при удалении от зоны пучности — конкретного мелководного резонатора. Процессы на других периодах длинных волн, отличных от составляющих характерного аккорда близлежащих резонаторов, рассеиваются на границах открытого моря и быстро прекращают сколь-нибудь значимое воздействие на побережье.

Выводы

Картирование интенсивности длинноволновых процессов для защищаемых участков морского побережья [Симаков, Храмушин, Шевченко, 2012] может служить не только традиционным инженерным задачам районирования морских акваторий по проявлениям потенциально опасных морских наводнений и экстремальных течений. Одновременное формирование цифровой базы знаний для разнообразных исторических штормовых нагонов и цунами обязательно должно задействоваться как для быстрых оценок развития неблагоприятных синоптических или сейсмических событий на море, так и с целью быстрого формирования надежных сценариев для прямых вычислительных экспериментов для прогноза наиболее опасных или катастрофических последствий у побережья в действующем регламенте морских оперативных служб.

В случае развертывания системы наблюдения за состоянием моря на Дальнем Востоке России прямые вычислительные эксперименты обретут наивысшую эффективность, так как могут задействоваться по факту превышения пороговых значений в скорости изменения уровня моря или опасных скоростей течений, независимо от типа вызвавшего их источника.

По результатам большой серии вычислительных экспериментов важно отметить, что именно штормовые наводнения представляют наибольшую опасность на морском побережье, так как они способны вызывать непредвиденные подъемы уровня моря и экстремальные течения под воздействием барических градиентов атмосферного давления, ветровых напряжений на поверхности мелководных шельфовых акваторий. Опасность штормовых наводнений усугубляется действием длиннопериодной зыби, глубоко проникающей на побережье, что чрезвычайно опасно для всех морских инженерных сооружений на побережье и рейдовых мелководьях.

Заключение

Длинноволновые вычислительные эксперименты чрезвычайно актуальны в задачах контроля состояния и прогноза необратимых или опасных процессов вблизи морского побережья России, имеющего наивысшую гидрофизическую активность и наибольшую протяженность во всем Мире. Практическая реализация прямых вычислительных экспериментов служит высококачественным инструментом для инженерных изысканий в открытом океане и в прибрежных мелководьях, которые по уровню точности и детализации не поддаются ни теоретическому, ни экспериментальному аналитическому обобщению.

Список литературы

- Симаков Е. Е., Храмушин В. Н., Шевченко Г. В.* Сахалин — море — Расчетные и регистрируемые колебания уровня моря на Дальнем Востоке России // СахГУ, Роспатент № 2012620509. — 2012.
- Храмушин В. Н.* Апі — Прямые вычислительные эксперименты для моделирования цунами, штормовых нагонов, экстремальных течений и приливного режима в открытом океане и вблизи побережья // СахГУ. Роспатент № 2010615848. — 2010.