УДК 519.6

© *Д.Ю.Тюгин*[1], *А.А.Куркин*[1], *Е.Н.Пелиновский*[1,2], *О.Е.Куркина*[1,3], 2012
[1]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева
[2]Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород
[3]Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Н.Новгород
aakurkin@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН IGW RESEARCH С ПОМОЩЬЮ INTEL® PARALLEL STUDIO XE 2013

Представлена новая версия программного комплекса, предназначенного для численного моделирования распространения и трансформации внутренних гравитационных волн в Мировом океане, с доработанным блоком расчета лучей внутренних волн и с распараллеливанием программы, что позволяет существенно ускорить проводимые вычисления. В качестве практического примера предлагается исследование захватывающих свойств шельфа Балтийского моря с точки зрения длинных внутренних волн на основе лучевого подхода. Рассчитаны значения коэффициента захвата и построены соответствующие карты.

Ключевые слова: численное моделирование, параллельные алгоритмы, рефракция волн.

Внутренние гравитационные волны вносят значительный вклад в процессы обмена в океане. Данный тип волн возникает вследствие неоднородной плотности воды с глубиной, обусловленной разницей температур и солености. Изучение волн этого типа является актуальной задачей с точки зрения как рационального природопользования, так и безопасности водных сооружений. В частности, максимальная нагрузка, вызванная сильнонелинейными внутренними волнами, пиковая горизонтальная скорость потока в которой достигает 2.1 м/с, сравнима с нагрузкой от поверхностной волны длиной 300 м и амплитудой 18 м [1]. На основании данных наблюдений в Южно-Китайском море в работе [2] сделан вывод о том, что они воздействуют на гидротехнические сооружения по сравнению с поверхностными волнами с гораздо большими нагрузками и изгибными моментами. В Андаманском море они были причиной сдвига буровых установок более чем на 20 м и значительного, до двухкратного, усиления натяжения якорных цепей [3]. Таким образом, при создании элементов опоры водных объектов нужно учитывать влияние на них внутренних волн, так как их воздействие может привести к разрушению опорного материала (4). На рис.1 представлена схема трансформации внутренней волны при движении в прибрежную зону (стрелками указано воздействие на рельеф дна при обрушении).

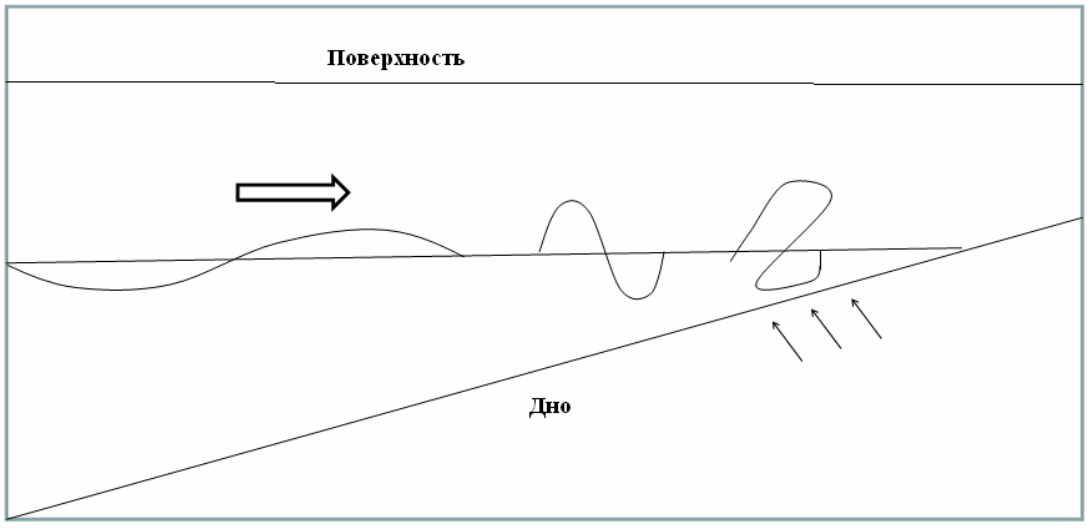

Рис.1. Воздействие внутренней волны на рельеф дна.

С другой стороны, построение более укрепленных структур может оказаться экономически невыгодным. Экспресс-оценки замкнутых акваторий на предмет характеристик поля внутренних волн на основе натурных и среднеклиматических данных позволят выделить безопасные области, где концентрация волновой энергии незначительна.

При изучении волновых явлений важную роль играет знание свойств среды, от которых зависит характер распространения волн. В частности, при исследовании длинных волн в океане большое значение имеет явление захвата волновой энергии горизонтальными неоднородностями среды, определяемое геометрическими особенностями рельефа морского дна и неоднородным фоновым распределением плотности по горизонтали, особенно в зоне шельфа – континентального склона – и прибрежной зоне.

Исследование захватывающих свойств акватории с точки зрения внутренних волн в чисто геометрическом смысле, т.е. без учета индивидуальных свойств источника, представляется особенно важным, в том числе в связи с возможным внедрением автоматизированных систем детектирования сильнонелинейных внутренних волн и информирования о них в режиме реального времени [5], подобных системам оповещения о волнах цунами. Речь идет о том, чтобы определить, какая часть энергии сгенерированных внутренних волн передается вдоль побережья, а какая уходит в открытое море.

Для решения подобных задач численными методами был разработан программный комплекс IGWResearch [6], содержащий реализацию ряда общепризнанных моделей по тематике длинных внутренних гравитационных волн в совокупности с интегрированными наборами данных параметров внутренних волн, полученными на основе международных гидрологических атласов (WOA [7], GDEM [8]) и модельных данных (RCO [9]). Комплекс содержит в себе все необходимые инструменты для проведения численного эксперимента и не требует знания языков программирования для работы с ним. В данной статье представлена новая версия комплекса с доработанным блоком расчета лучей внутренних волн, допускающая распараллеливание, что позволяет существенно ускорить проводимые вычисления. В качестве примера предлагается исследование захватывающих свойств шельфовой зоны Балтийского моря на основе лучевого подхода. Рассчитаны коэффициенты захвата длинных линейных внутренних волн и построены соответствующие карты.

Рефракционная модель. По существу основные идеи для длинных внутренних волн были взяты из теории поверхностных гравитационных волн в однородной жидкости. Простейшим методом описания распространения волн в слабонеоднородном океане является лучевая теория [10–16]. Процесс рефракции внутренних волн в условиях реального океана весьма сложен, поскольку свойства среды неоднородны, анизотропны и изменяются со временем. Сложностью является также то, что для реальных океанских стратификаций дисперсионное соотношение для внутренних волн не имеет явного аналитического выражения и находится из решения основной краевой задачи [17]. Лучевые уравнения [10, 14, 18, 19], описывающие распространение монохроматической волны с произвольной частотой, имеют вид:

$$\frac{d\vec{\mathrm{R}}}{ds} = \frac{c^2}{\omega}\vec{\mathrm{k}}, \qquad \frac{d\vec{\mathrm{k}}}{ds} = -(\nabla c)\,|\,\vec{\mathrm{k}}\,|, \tag{1}$$

где $\vec{\mathrm{R}} = \{x,y\}$ координаты радиус вектора точки на луче; $\vec{\mathrm{k}} = \{k_x, k_y\}$ – волновой вектор, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ – модуль волнового вектора; $\omega = ck$ – частота длинных волн; $\nabla = \left\{\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right\}$ – дифференциальный оператор; $c = c(x, y)$ – фазовая скорость внутренних волн; s – время на луче. Зависимость фазовой скорости от времени не учитывается в работе, поскольку даже сезонные изменения этого параметра не велики для внутренних волн. Таким образом, при построении модели мы считали, что рефракция внутренних волн определяется преимущественно пространственной неоднородностью вод океана.

Система дифференциальных уравнений (1) решается методом Рунге–Кутта 5-го порядка. В качестве внешних условий задается матрица распределения фазовой скорости на географической сетке рассматриваемой акватории. Разрешение сетки в задаче соответствует исходному разре-

шению сетки данных температуры и солености из соответсвующего атласа. Выходными данными при решении системы являются траектории лучей, позиции волновых фронтов определяются как линии постоянной фазы (рис.2).

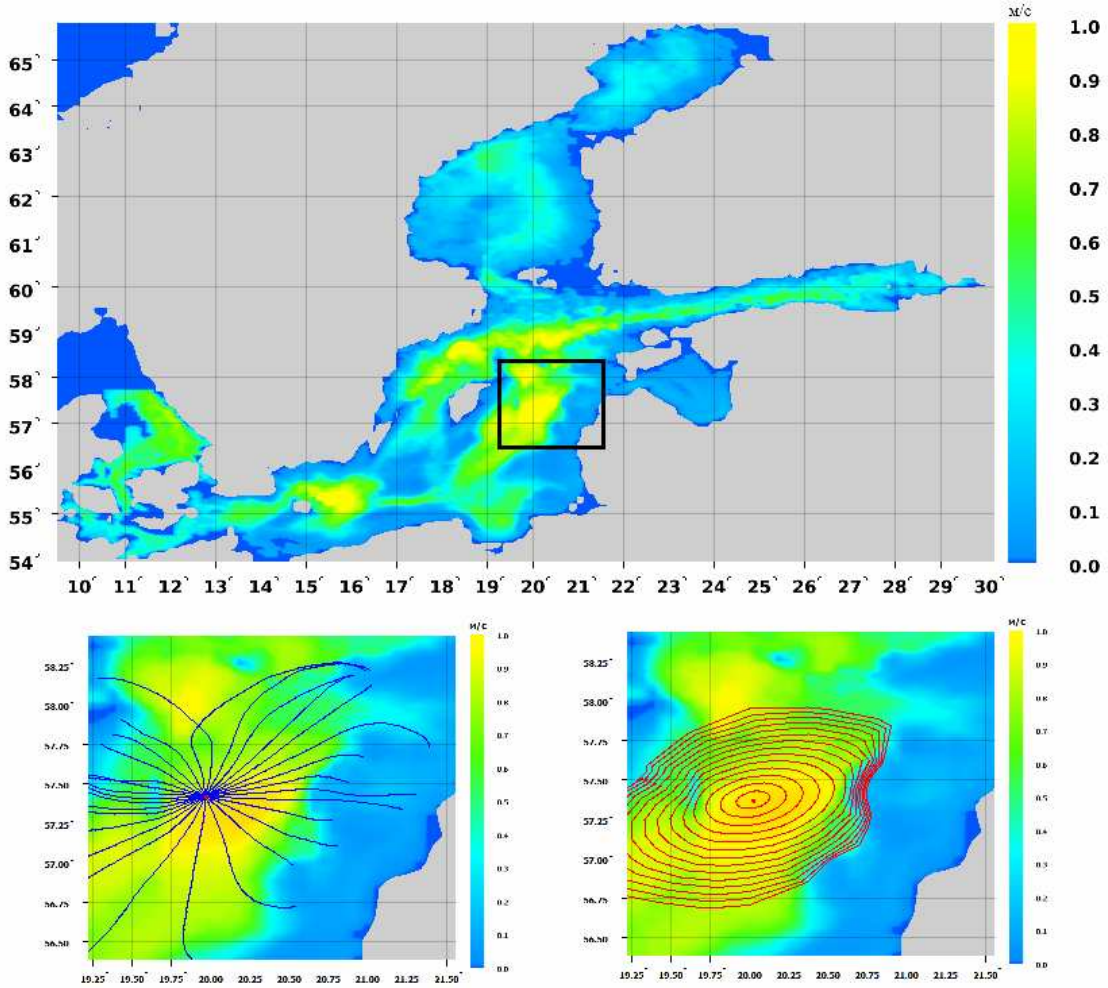

Рис.2. Пример результатов расчета лучевых уравнений.
Вверху – участок акватории Балтийского моря, внизу: слева – траектории лучей, справа – линии фронтов.

Лучевая картина, в частности, дает качественное представление о распределении энергии внутреннего волнового поля в горизонтальной плоскости. Энергия концентрируется, где фокусируются волновые лучи, и уменьшается там, где лучи разрежаются.

Для изучения степени захвата вводится понятие локального коэффициента захвата. Рассматриваются точечные изотропные источники волн в каждом узле сетки, из них с равным шагом по начальному углу выпускается n = 200 лучей (увеличение числа лучей уже не влияет на результат вычислений); лучи рассчитываются до достижения зоны низкой фазовой скорости (критерием прекращения его расчета является то, что он не покидает текущую ячейку сетки за 1000 шагов), и коэффициент захвата определяется как отношение количества захваченных лучей в данной ячейке к общему числу лучей, участвующих в расчетах. Такое определение коэффициента захвата адаптировано нами для внутренних волн в соответствии с введенным в работе [20] при исследовании оценок явления топографического захвата волновой энергии длинных поверхностных волн (волн цунами) на Курильском шельфе. Локальный коэффициент захвата определяется формулой

$$K_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} C_{ij} n_{ij}}{R \cdot N} \cdot 100\%, \qquad (2)$$

где K_{ij} – величина коэффициента захвата для точки (i, j) исходной сетки, C_{ij} – значение фазовой скорости в точке, n_{ij} – число конечных точек лучей в ячейке сетки точки (i, j), R – общее число лучей, N – общее число точек сетки. Ниже описан процесс расчета коэффициента захвата.

Последовательный и параллельный алгоритмы. На рис.3 представлена схема последовательного алгоритма расчета коэффициента захвата (2).

Сетка данных представляет собой двухмерный массив значений фазовой скорости (широта и долгота) с шагом в 1/15 и 1/30° по широте и долготе соответственно. Для каждой точки сетки данных моделируется распространение волны: выбирается число лучей для представления волны (в данном случае 200), задаются координаты исходной точки **(**Refraction2::setPoint(x,y)**)** и матрица значений фазовой скорости $c(x, y)$, направление луча; выполняется решение системы уравнений (1) методом Рунге–Кутта для первого луча **(**RefRaySolver::init(1)**)**, для второго и т.д. Данные траекторий для текущей точки сохраняются в результирующем контейнере. Проводится шаг алгоритма для следующей точки. После расчета всех точек коэффициент захвата вычисляется на основе полученных траекторий по формуле (2).

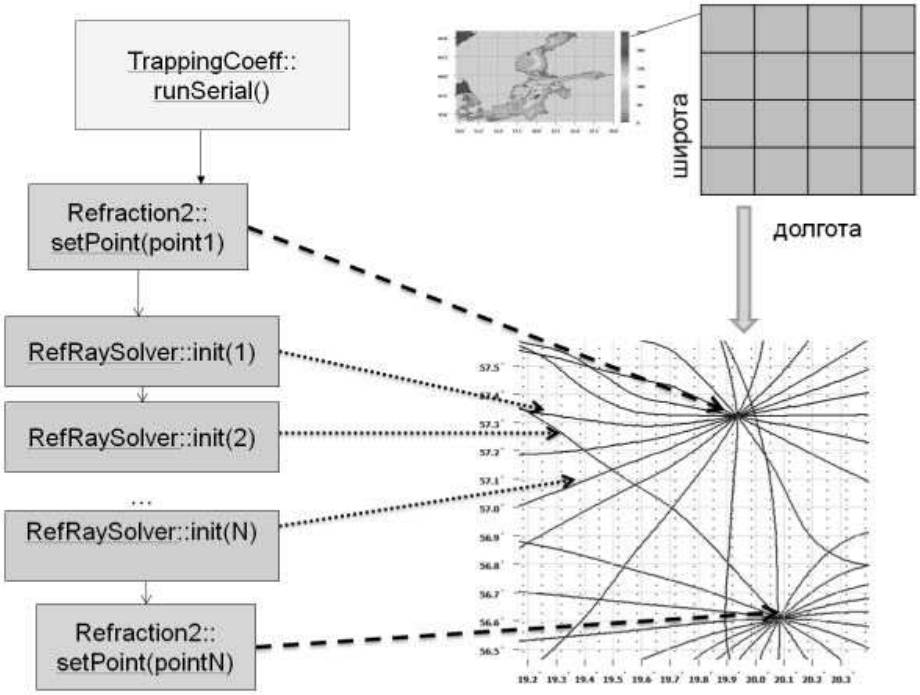

Рис.3. Схема последовательного расчета коэффициента захвата (2).

Как видно из алгоритма, расчет каждого луча в каждой точке независим и может быть проведен отдельно. Расчет большого числа точек и лучей требует длительного времени, и данная схема имеет большой потенциал для параллелизации. Стоит отметить, что вычисление одного луча не является слишком длительной операцией, поэтому параллелизация по точкам предполагается более эффективной.

Для поддержки процесса параллелизации кода в Intel® Parallel Studio XE 2013 имеются все необходимые инструменты, которые позволяют существенно снизить временные и человеческие ресурсы на поиск мест распараллеливания; оценки эффективности, а также поиск и анализ узких с точки зрения производительности мест в коде.

Использование программного продукта Intel® Advisor XE показало место кода, где параллелизация даст наиболее эффективный результат. В данном случае это место соответствует функции TrappingCoeff::runSerial(), реализующей расчет волны для каждой географической точки. На основе области кода для параллелизации была составлена схема параллельного алгоритма (рис.4).

Данная схема предполагает, что расчеты точек будут проводиться параллельно.

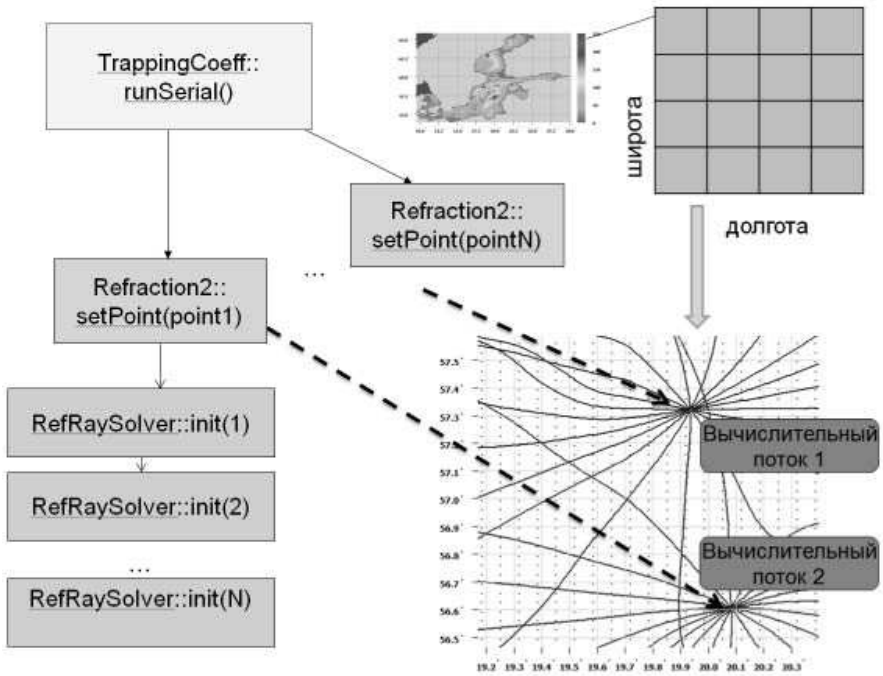

Рис.4. Схема параллельного алгоритма.

Анализ достигнутой производительности. Были проведены замеры времени выполнения параллельного и последовательного алгоритмов (рис.5). Замеры проводились на двухпроцессорной машине с процессорами Intel® Xeon® 5570 2.93 ГГц, 16 Гб оперативной памяти, ОС Windows 7.

На основании замеров был построен график ускорения (отношения времени выполнения последовательного алгоритма к времени выполнения параллельного) (рис.6).

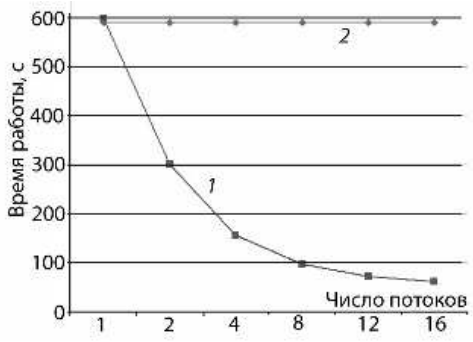

Рис.5. Время выполнения параллельного (*1*) и последовательного (*2*) алгоритмов.

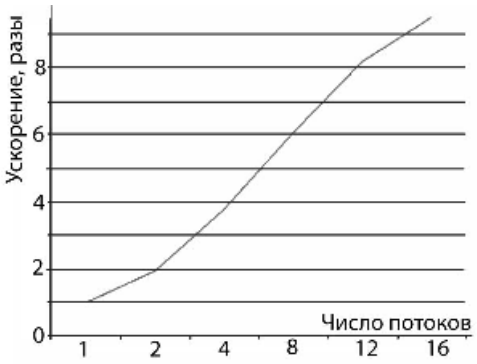

Рис.6. Зависимость ускорения от числа потоков.

Как видно из рис.6, реальное ускорение становится меньше предсказанного (в идеальном случае – ускорение прямо пропорционально числу потоков). Причиной тому могут быть дополнительные синхронизации, которые добавляются в параллельную версию, накладные расходы библиотек Intel® TBB и т.п.

***

Применение Intel® Parallel Studio XE 2013 показало высокую эффективность при разработке параллельных алгоритмов. Инструменты Intel® Parallel Studio XE 2013 позволяют существенно облегчить и ускорить процесс параллелизации кода. Моделирование параллельной версии алгоритма без значительной модификации кода позволяет оценить ускорение на этапе проектирования параллельного алгоритма. Анализ ошибок позволяет найти неочевидные и предотвра-

тить получение неверных результатов или нестабильной работы приложения. Без инструментов анализа производительности практически невозможно определить степень корректности параллельной реализации с точки зрения производительности.

На рис.7 представлен результат расчета коэффициента захвата для акватории Балтийского моря.

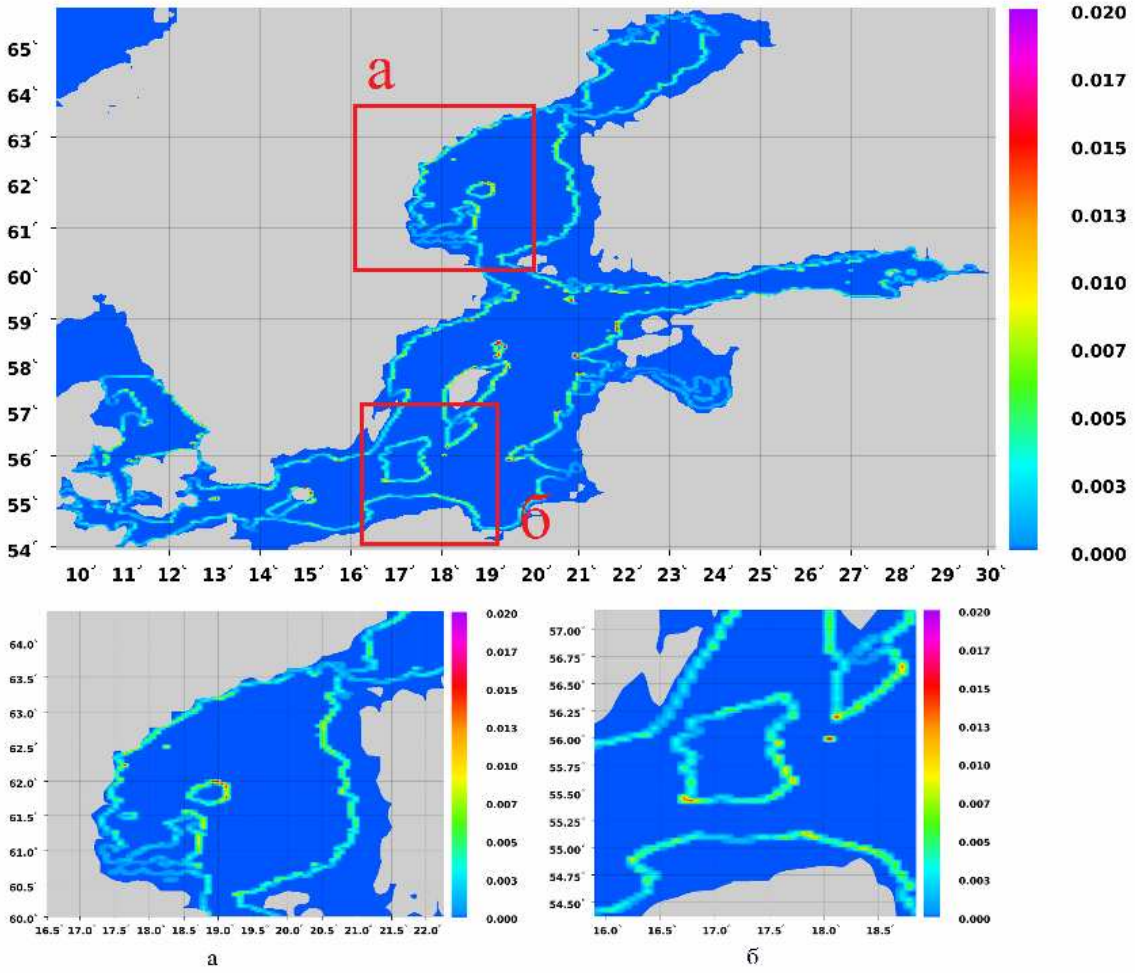

Рис.7. Коэффициент захвата внутренних волн для акватории Балтийского моря.

Разработанная реализация параллельного алгоритма позволила сократить время расчетов в 10 раз на 16-ядерной машине, что позволит в дальнейшем проводить расчеты на более точных сетках с бóльшим числом данных.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации Гранта «Применение Intel® Parallel Studio 2013 XE Beta в разработке эффективных параллельных алгоритмов (договор № NN/R&D/56/2012 от 30.03.2012 г.) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

Литература

1. *Du T.* et al. An estimation of internal soliton forces on a pile in the ocean // J. Ocean Univ China. 2007. V.6, N 2. P.101–106.
2. *Cai S.* et al. A method to estimate the forces exerted by internal solitons on cylindrical piles // Ocean Eng. 2003. V.30, N 5. P.673–689.
3. *Osborne A.R.* et al. The influence of internal waves on deep-water drilling // J. Petroleum Technol. 1978. V.30, N 10. P.1497–1504.
4. *Song Z.J.* et al. Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses //App. Ocean Res. 2011. V.33. P.120–129.
5. *Stuber U., Moum J.N.* On the potential for automated realtime detection of nonlinear internal waves from seafloor pressure measurements // Ebed. P.275–285.

6. *Тюгин Д.Ю., Куркина О.Е., Куркин А.А.* Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в Мировом океане // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. № 4(2). С.32–44.
7. *Conkright M.E.* et al. World Ocean Database 2001, V.1: Introduction // Ed. S.Levitus, NOAA Atlas NESDIS 42. U.S. Government Printing Office, Wash., D.C. 2002. 160 p.
8. *Teague W.J.* et al. A Comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus Climatologies // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. C5. P.7167–7183.
9. *Soomere T.* et al. Patterns of current-inducted transport in the surface layer of the Gulf of Finland // Boreal Environment Res. 2001. V.16. P.49–63.
10. *Бреховских Л.М., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
11. *Воронович А.Г.* Распространение внутренних и поверхностных гравитационных волн в приближении геометрической оптики // Изв. АН СССР. ФАО. 1976. Т.12. С.519–523.
12. *Доценко С.Ф.* Вычисление времен добегания длинных волн в Черном море лучевым методом // Морской гидрофиз. журн. 1993. № 2. С.39–43.
13. *Доценко С.Ф., Коновалов А.В.* Численное моделирование распространения цунами в Черном море // Морской гидрофиз. журн. 1996. № 5. С.65–77.
14. *Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 303 с.
15. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами. Горький: ИПФ АН СССР, 1982.
16. *Пелиновский Е.Н.* Гидродинамика волн цунами. Н.Новгород: ИПФ РАН, 1996. 276 с.
17. *Миропольский Ю.З.* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 302 с.
18. *Ле Блон П., Майсек Л.* Волны в океане. Т.1, 2. М.: Мир, 1981.
19. *Broutman D.* et al. Ray methods for internal waves in the atmosphere and ocean // Ann. Rev. of Fluid Mech. 2004. V.36. P.233–253.
20. *Файн И.В.* и др. Исследование лучевым методом захватывающих свойств Курильского шельфа // Океанология. 1983. Т.23, № 1. С.23–26.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012 г.