



## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Каган Б.А., Софьина Е.В., Рашиди Э.Х.А.</i> Чувствительность приливной динамики к пространственной изменчивости гидродинамической шероховатости дна на примере Печорского моря .....	4
<i>Мортиков Е.В.</i> Численное моделирование влияния стратификации на силу сопротивления при движении ледяного киля в двухслойной жидкости .....	12
<i>Шамин Р.В., Смирнова А.И., Юдин А.В.</i> Вопросы обнаружения и прогнозирования волн-убийц в вычислительных экспериментах .....	23
<i>Зимин А.В., Пикуль Т.А.</i> Использование вейвлет-преобразования для выделения характеристик внутренних волн .....	34
<i>Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Бураков В.А., Буркин В.В., Зыков Е.Н., Иценко А.Н., Родионов А.А., Симоненко В.Г., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т.</i> Расчет высокоскоростного движения инерционной модели при входе в воду и ее взаимодействие с металлической преградой .....	43
<i>Мальшикин Г.С., Воронина Н.Г., Смирнов А.С., Тимофеев В.Н.</i> К вопросу об оптимизации параметров корабельных бортовых протяженных антенн при неравномерном распределении уровня помехи .....	56
<i>Голубев А.Г.</i> Об алгоритме квазисогласованной фильтрации тональных эхосигналов .....	69
<i>Левин И.М., Радомысльская Т.М., Савченко В.В.</i> Видимость нефтяных пленок на поверхности воды из космоса .....	75
<b>Научные сообщения</b>	
<i>Зимин А.В., Родионов А.А., Здоровеннов Р.Э., Романенков Д.А., Шевчук О.И., Родионов М.А., Жегулин Г.В.</i> Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в Белом море в июле–августе 2012 г. с научно-исследовательского судна «Эколог» .....	85
<i>Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Куркина О.Е.</i> Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013 .....	89
<b>Рецензия на книгу</b>	
<i>Галиев Ш.У.</i> Геофизические сообщения Чарльза Дарвина как модели теории катастрофических волн...	96
<b>Из истории науки</b>	
<i>Корчагин Н.Н.</i> Андрей Сергеевич Монин .....	97
<b>Конференции</b> .....	103
<b>Поздравляем!</b> .....	106
<b>Хроника</b> .....	107
Правила представления материалов в редакцию.....	109

## CONTENTS

### Articles

- Kagan B.A., Sofina E.V., Rashidi E.* Sensitivity of the Tidal Dynamics to the Spatial Variability of Hydrodynamic Roughness of the Bottom as Illustrated by the Pechora Sea Example 4

The results of investigation of the Pechora Sea tidal dynamics sensitivity to variations of the external governing parameters, obtained with the use of the 3D finite-element hydrostatic model QUODDY-4, are considered in this paper. It is shown that the tidal characteristics are weakly sensitive to variations of the critical depth separating the subdomains of rough and incompletely rough bottoms, and are strongly sensitive to variations of hydrodynamic roughness of the bottom.

**Key words:** hydrodynamically rough and incompletely rough bottoms, modeling, resistance laws, spatial inhomogeneity of the bottom roughness, the Pechora Sea.

- Mortikov E.V.* Numerical Simulation of the Stratification Effect on the Drag Coefficient of a Moving Ice Keel in a Two-Layer Fluid ..... 12

This paper considers numerical simulation of a moving ice keel in a two-layer fluid. The immersed boundary method is used for modeling of the non-stationary complex geometry on the rectangular grids. The results of the drag force computations for various Froude numbers are presented in comparison with the laboratory experiments.

**Key words:** sea ice, two-layer fluid, drag coefficient, immersed boundary method, graphic processors.

- Shamin R.V., Smirnova A.I., Ydin A.V.* Questions of Detection and Forecasting of Waves-Killers in Numerical Experiments ..... 23

Methods of forecasting and detection of rogue waves in numerical experiments are considered. Methods of operational forecast of freak waves, as well as the methods of remote sensing of the sea surface and application of computing experiments to validation of in-situ measurements, are suggested and analyzed.

**Key words:** rogue waves, computing experiments, mathematical simulations.

- Zimin A.V., Picul T.A.* Use of Wavelet Transformation for Detection of Internal Waves Characteristics ..... 34

The presence of an internal tidal bar and intensive internal wave packets with the period of 10-20 minutes were detected from the in-situ data obtained on the White Sea shelf. Along with the standard methods the wavelet analysis was applied to describe the internal wave characteristics. A well-grounded choice of a wavelet basis and its construction method was carried out. Different options of wavelet transformation are shown while describing nonlinear waves.

**Key words:** internal waves, contact sensing, wavelet analysis, the White Sea shelf.

- Afanaseva S.A., Belov N.N., Burakov V.A., Burkin V.V., Zykov E.N., Ishchenko A.N., Rodionov A.A., Simonenko V.G., Khabibullin M.V., Yugov N.T.* Calculations of High-Speed Movement of the Inertial Model Entering the Water, and Its Interaction with the Metal Target ..... 43

An initial stage of high-speed penetration of a needle-shaped metal body into the water and its interaction with the metal target are considered. The calculations are carried out in the frame of the continuum mechanics: for a solid body an elastic-plastic model, with allowance for destruction, is suggested, while for the water fluid mechanics equations are used. Over the considered range of speeds of 1.0–2.5 km/s, when the body is entering the water, a mode of developed cavitation occurs; the plastic deformation of the head part of the striker, and in some cases, its destruction, are observed, which leads to increase of the penetration resistance.

**Key words:** experimental, mathematical modeling, high-speed interaction, metal, water.

<i>Voronina N.G., Malyshkin G.S., Smirnov A.S., Timofeev V.N.</i> On the Issue of Optimization of Ship Broadside Extended Antennae Parameters, with Non- Uniform Distribution of Noise Level .....	56
--	----

The paper considers a way of weight coefficients optimization for a ship broadside extended multi-element antenna, with allowance for a number of requirements for its parameters, with the non- uniform noise level distribution over the antenna elements.

**Key words:** hydroacoustic, linear extended array-based antenna, broadsides antenna, not uniform noise, compromise optimization on the number of parameters.

<i>Golubev A.G.</i> On Algorithm of the Quasi-Matched Filtration of Tone Echo-Signals .....	69
---	----

For filtration of the tone echo-signals in the presence of reverberation interference, a narrow-band filter is synthesized, with the AFC being at a low level beyond the passband. The given property of the filter is reached due to introduction of a weighing window in the process of the spectral analysis. A traditional choice of a spectral decomposition interval, as well as the choice of the parameters of a specified window, results in the width of a filter passband being unmatched with duration of an echo-signal. The paper considers a problem of synthesis of an improved filter, with no defect described above.

**Key words:** filtration, reverberation, echo-signal, window, signal against noise ratio.

<i>Levin I.M., Radomyslskaya T.M., Savchenko V.V.</i> Visibility of Oil Films on the Water Surface From Space .....	75
---	----

Algorithms and results of the calculations of the apparent contrast of oil films on the sea surface are given for the case of observations from space in visual, ultraviolet and infrared spectral ranges (300–800 nm). The calculations were carried out for different water types and optical thicknesses of the maritime atmosphere and for various solar altitudes and wind velocities. It is shown that the oil films on the sea surface can be detected if the wind velocity ranges from 6 to 20 m/s and the solar zenith angle varies from 0 to 45 degrees. The greatest values of the contrast correspond to the highest wind velocities and solar zenith angle.

**Key words:** oil films, sea surface, contrast.

### Scientific Messages

<i>Zimin A.V., Rodionov A.A., Zdorovenov R.E., Romanenkov D.A., Shevchuk O.I., Rodionov M.A., Zhegulin G.V.</i> Research of the Short-Term Variability of Hydrophysical Fields in the White Sea in July-August 2012 Onboard the Research Vessel "Ecology" .....	85
---	----

The information on the expedition of St. Petersburg branch of the Institute of Oceanology is provided. The purpose of work is accumulation of meteorological data to study variability of the local hydrophysical fields, produced by the tidal variations, in the White Sea areas differing in hydrological conditions.

**Key words:** internal waves, probing, satellite radar images, White Sea.

<i>Tyugin D., Kurkin A., Pelinovsky E., Kurkina O.</i> Increase of Productivity of the Program Complex for Modeling of Internal Gravity Waves IGW Research with the Help of Intel® Parallel Studio XE 2013 .....	89
--	----

The new version of the program complex intended for numerical modeling of propagation and transformation of internal gravity waves in the ocean, with a finalized unit calculation of a ray of internal waves and with a paralleling of the program, which can significantly speed up the ongoing computation is presented. As a practical example of the proposed study additive properties of the shelf of the Baltic Sea from the point of view of long internal waves on the basis of the ray approach is offered. The values of the coefficient of capture are calculated and the corresponding maps are constructed.

**Key words:** numerical modeling, parallel algorithms, wave refraction.

УДК 519.6

© Д.Ю.Тюгин<sup>1</sup>, А.А.Куркин<sup>1</sup>, Е.Н.Пелиновский<sup>1,2</sup>, О.Е.Куркина<sup>1,3</sup>, 2012

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

<sup>3</sup>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).

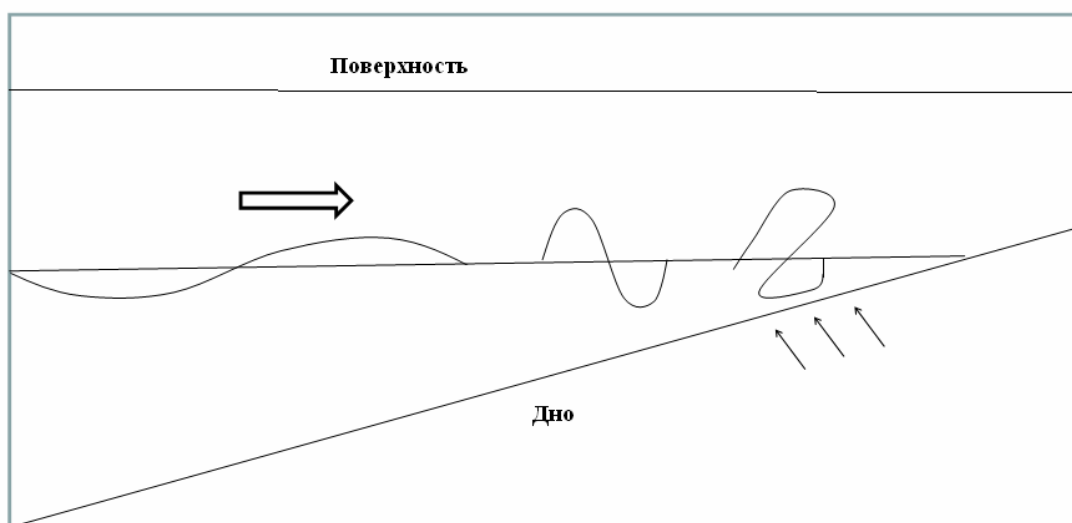


Рис.1. Воздействие внутренней волны на рельеф дна.

С другой стороны, построение более укрепленных структур может оказаться экономически невыгодным. Экспресс-оценки замкнутых акваторий на предмет характеристик поля внутренних волн на основе натуральных 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 – континентально-го 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:

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

где  $\vec{R} = \{x, y\}$  – координаты радиус вектора точки на луче;  $\vec{k} = \{k_x, k_y\}$  – 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–Кутты 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 соответствующего атласа. Выходными данными при решении системы являются траектории лучей, позиции волновых фронтов определяются как линии постоянной фазы (рис.2).

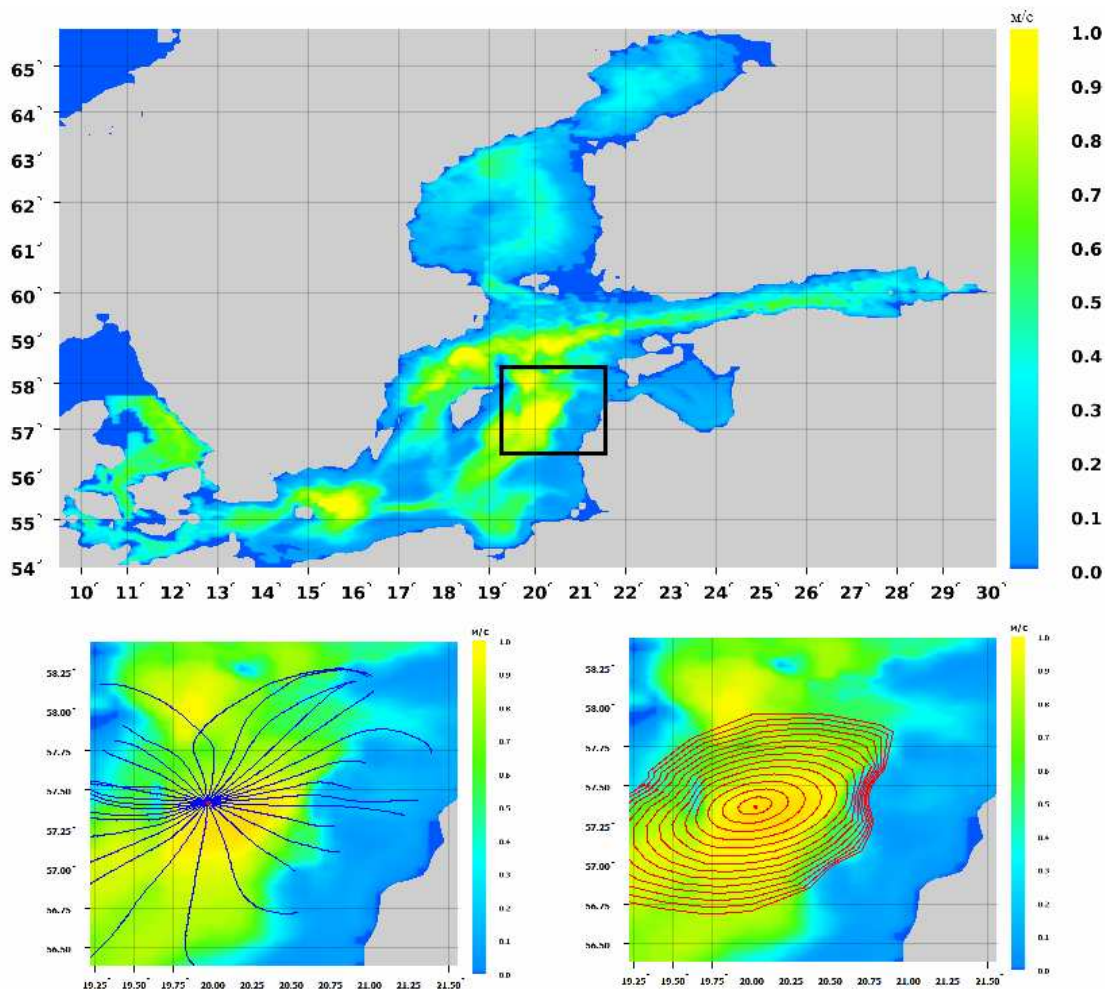


Рис.2. Пример результатов расчета лучевых уравнений.  
Вверху – участок акватории Балтийского моря, внизу: слева – траектории лучей, справа – линии фронтов.

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

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

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  $1/30^\circ$  по широте и долготу 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–Кутты 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).

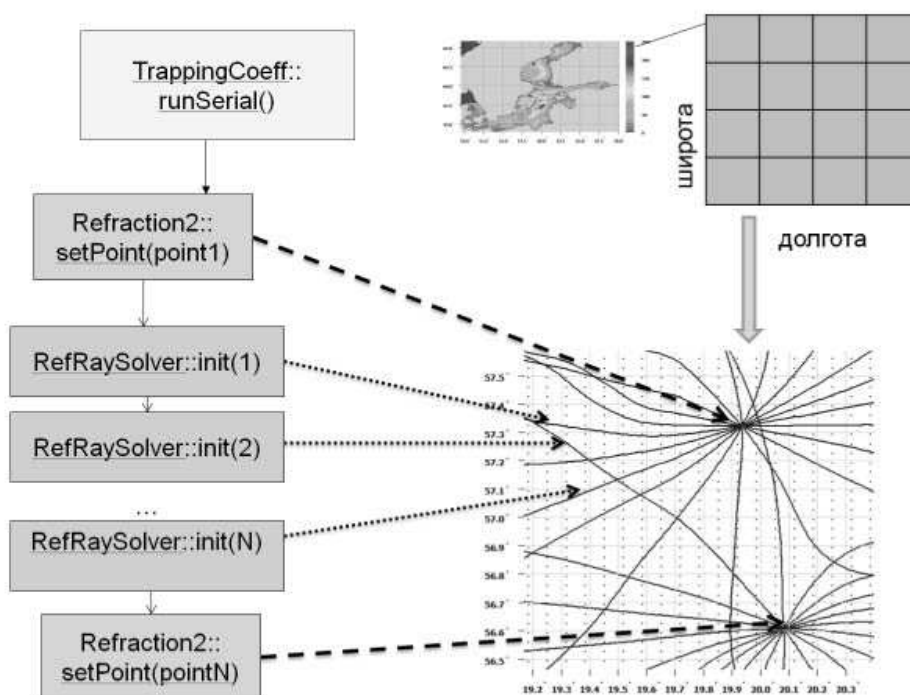


Рис.3. Схема последовательного расчета коэффициента захвата (2).

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.

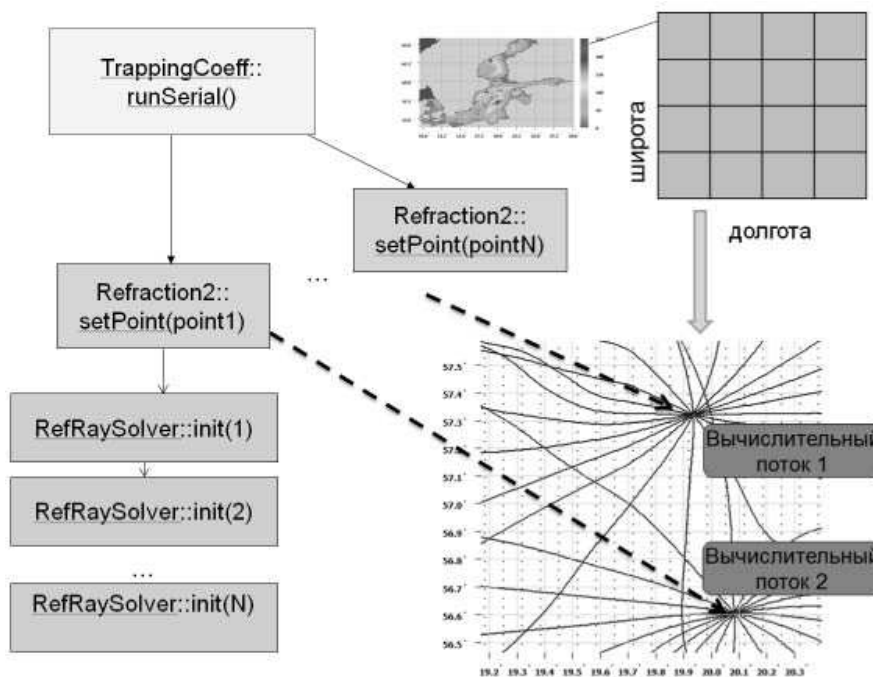


Рис.4. Схема параллельного алгоритма.

**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).

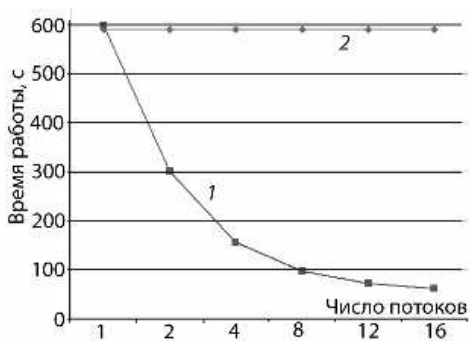


Рис.5. Время выполнения параллельного (1) и последовательного (2) алгоритмов.

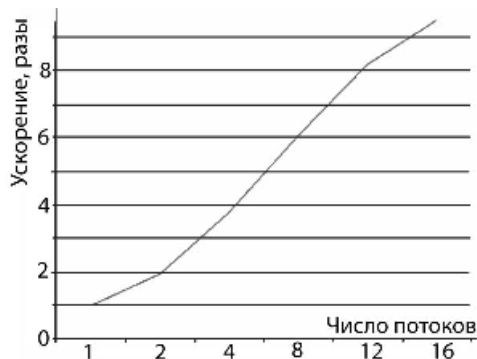


Рис.6. Зависимость ускорения от числа потоков.

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-



туть 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.

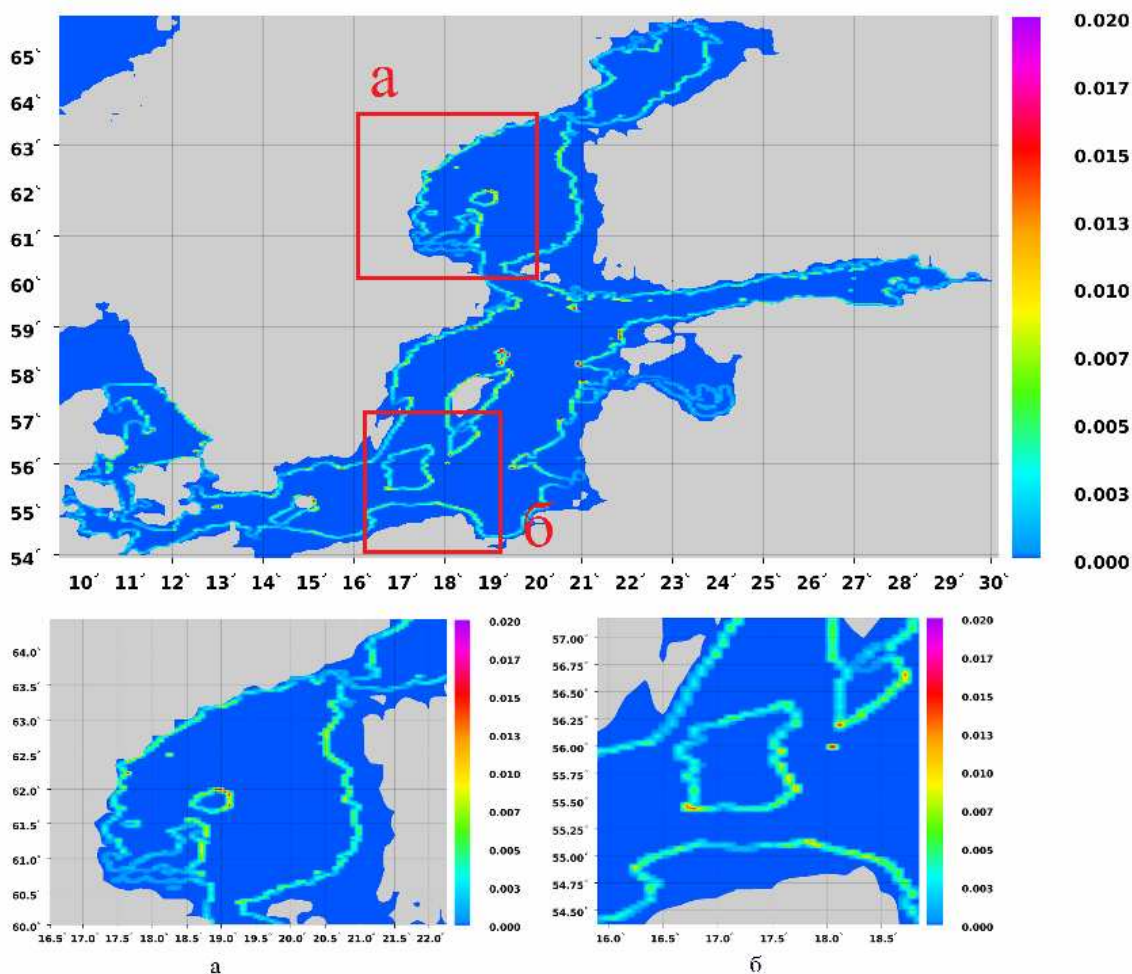


Рис.7. Коэффициент захвата внутренних волн для акватории Балтийского моря.

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 большим 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-induced 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. Крацов 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.: Гидрометеиздат, 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.

