

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ КОСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ОБШИРНЫХ АКВАТОРИЙ

© 2020 г. В. Е. Воробьев^а, А. Б. Мурынин^а, К. С. Хачатрян^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*e-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.

Описаны высокопроизводительные методы регистрации спектров морской поверхности по космическим изображениям для решения задач оперативной океанографии. Разработаны алгоритмы и исследовательское программное обеспечение, реализующие методы оперативного восстановления характеристик морской поверхности по космическим изображениям. Проведено тестирование разработанных алгоритмов и получены оценки их производительности на экспериментальных данных. Разработанное исследовательское программное обеспечение предназначено для работы с применением многоядерных процессоров. В результате численных экспериментов установлено, что программное обеспечение выполняет восстановление спектров уклонов и возвышений морской поверхности с применением разработанных высокопроизводительных методов с погрешностью не более 1%. Проведенные вычислительные эксперименты продемонстрировали значительное увеличение производительности регистрации спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений за счет распараллеливания вычислений – в 5 раз при использовании только центрального процессора стандартного настольного компьютера и более чем в 12 раз при использовании графического процессора с технологией CUDA. Приведены примеры применения разработанных алгоритмов при мониторинге обширных акваторий Черного моря и Тихого океана.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, взволнованная морская поверхность, спектры волнения, космические изображения, высокопроизводительная обработка, параллельные вычисления

DOI: 10.31857/S0205961420020062

ВВЕДЕНИЕ

Методы дистанционного зондирования широко применяются для исследования различных процессов и явлений, происходящих в морях и океанах (Бондур, 2004, 2010; Бондур и др., 2006б, 2008а, 2010, 2012, 2017б; Бондур, Зубков, 2005; Бондур, Шарков, 1982, 1986; Bondur, Zamshin, 2018), а также для мониторинга загрязнений морских акваторий и выявления нефтегазопроявлений на них (Бондур, 2010; Бондур и др., 2006б, 2012, 2017а; Ивонин, Иванов, 2017; Bondur, 2005, 2011). Эффективность таких методов существенно повышается при сочетании с непосредственными подспутниковыми измерениями различных параметров водной среды (Бондур и др., 2007, 2008б, 2009, 2013, 2017; Keeler et al., 2004; Bondur, 2005, 2011; Bondur, Tsidilina, 2005), а также с использованием методов математического и физического моделирования (Бондур и др., 2006а, 2009, 2018; Bondur, 2005, 2011)

Одним из путей решения многих актуальных фундаментальных и прикладных задач современ-

ной океанологии, является регистрация спектров морского волнения (Филлипс, 1980; Бондур, 2004; Бондур, Замшина, 2008; Toba J., 1973; Bondur, 2005, 2011). Получение информации о таких спектрах важно для исследования различных физических процессов, происходящих на поверхности и в приповерхностном слое морей и океанов, а также для оперативного мониторинга загрязнений водной среды, в том числе вызванных антропогенными воздействиями и нефтегазопроявлениями (Бондур, 2004, 2010; Ивонин, Иванов, 2017; Bondur, 2005, 2011; Bondur, Zamshin, 2018). Для получения двумерных спектров поверхностного волнения на больших площадях, целесообразно получение и обработка космических изображений высокого пространственного разрешения, а также изображений, получаемых с воздушных носителей (Бондур, 2004, 2010, 2014; Бондур, Старченков, 2001; Бондур, Замшина, 2008; Bondur, 2005, 2011).

Адекватная оценка спектров поверхностного волнения, формируемых путем обработки изоб-

ражений, получаемых в процессе аэрокосмического мониторинга акваторий морей и океанов, требует использования специальных восстанавливающих операторов, позволяющих преобразовать поля яркости, регистрируемые оптическими данными, в спектры углов и возвышений морских волн (Бондур, 2004; Бондур, Мурынин, 1991, 2015; Бондур и др., 2016а, б; Yurovskaia et al., 2013). Эти операторы строятся с использованием методов численного моделирования на основе учета различных условий формирования аэрокосмических изображений и характеристик аппаратуры дистанционного зондирования (Бондур, 2000а, б; Бондур, Савин, 1995; Бондур, Мурынин, 1991, 2015; Бондур и др., 2003, 2016а, б; Мурынин, 1990, 1991).

При оперативном дистанционном мониторинге обширных акваторий для получения двумерных спектров волнения необходима разработка высокопроизводительных методов и алгоритмов обработки больших объемов данных. Такие методы и алгоритмы должны разрабатываться на основе выполнения процедур восстановления спектров уклонов и возвышений морской поверхности с применением нелинейных восстанавливающих операторов с использованием параллельных вычислений (Воеводин, Воеводин, 2002; CUDA, 2019; The open MP, 2019).

В настоящей работе разрабатываются высокопроизводительные автоматизированные методы и алгоритмы регистрации спектров морского волнения по космическим изображениям высокого пространственного разрешения для решения задач оперативной океанографии, в интересах охраны окружающей среды и рационального природопользования акваторий морей и океанов, которые могут применяться, в том числе, в многоспутниковых системах космического мониторинга. Приводятся результаты применения предложенных автоматизированных методов и алгоритмов обработки при проведении космического мониторинга в различных акваториях.

БАЗОВЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В качестве базового метода для разработки высокопроизводительных методов и алгоритмов регистрации спектров морского волнения по фрагментам космических изображений для решения задач оперативной океанографии используется метод восстановления спектров морской поверхности, учитывающий нелинейный характер формирования поля яркости морской поверхности (Бондур, 2004; Бондур, Мурынин, 2015, 1991; Бондур и др., 2016а, б; Мурынин, 1990, 1991). Этот нелинейный метод, не требующий соблюдения ограничений по выбору условий получения фраг-

ментов изображений, использован в настоящей работе для разработки высокопроизводительных методов и алгоритмов оперативной регистрации спектров морского волнения по космическим изображениям высокого пространственного разрешения.

Поскольку связь полей уклонов и высот морской поверхности, а также их спектров с полями яркости имеют вид, сложный для аналитического решения задачи, то целесообразно использовать прямое численное моделирование изображений морской поверхности и расчет возникающих искажений спектров волнения (Бондур, 2000а, б; Бондур, Мурынин 2015, 1991).

Для получения восстанавливающих операторов численным методом выполняется следующая последовательность операций:

- синтезируются двумерные случайные поля уклонов морской поверхности $\xi_\alpha(x, y)$, $\alpha = x, y$ при заданных спектрах возвышений $G(k)$;
- рассчитывается поле яркости $B(x, y)$ для заданных условий освещения и визирования с учетом различных физических процессов, участвующих в его формировании;
- поле яркости $B(x, y)$ пересчитывается в сигнал модельного изображения $b_m(x, y)$ с учетом заданных характеристик регистрирующей аппаратуры и слоя атмосферы между поверхностью и приемником (Бондур, 2000а, б).

Оператор \mathbf{R} определяется путем сопоставления спектров модельного оптического изображения $S_m(k)$ со спектрами уклонов, связанных со спектрами возвышений $G(k)$ (Бондур, 2004)

$$\Phi_m(k) = (\cos \varphi_c k_x + \sin \varphi_c k_y)^2 G(k) \quad (1)$$

соответствующими направлением φ_c , определяемому заданными условиями освещения и визирования, например, в виде пространственно-частотного фильтра (Мурынин, 1990, 1991)

$$R(k) = \Phi_m(k) / S_m(k). \quad (2)$$

При таком определении восстанавливающего оператора получение спектров уклонов морского волнения сводится к применению к спектрам фрагментов космического изображения пространственно-частотных фильтров $R(k)$, представляющих собой передаточные функции, которые характеризует представление различных волновых компонент в пространственных спектрах изображений.

При численном моделировании изображений морской поверхности должны задаваться параметры, определяющие условия формирования этих изображений, и, следовательно, в той или иной мере влияющие на вид восстанавливающего оператора $R(\vec{k})$ (Бондур, 2000а, б; Бондур, Савин,

1995; Бондур и др., 2003). При обработке реальных космических изображений морской поверхности эти параметры берутся непосредственно из условий проведения съемки.

Наиболее очевидный способ получения восстанавливающего оператора с характеристиками, соответствующими реальным условиям получения и обработки экспериментальной информации, состоит в непосредственном моделировании по описанной методике. Однако, поскольку получение модельных оптических изображений морской поверхности является довольно трудоемкой процедурой, то такой способ получения оператора $R(\vec{k})$ целесообразен лишь при обработке одиночных изображений морской поверхности или их фрагментов. Его сложно использовать для анализа больших потоков космической информации с изменяющимися условиями формирования изображений.

В этом случае предпочтительнее другой подход к определению восстанавливающего оператора $R(\mathbf{k})$. Он предполагает выполнение предварительного численного моделирования изображений морской поверхности при различных комбинациях параметров, объединенных в многомерный вектор набора условий \mathbf{W}_R (Бондур, 2000а, б). При каждом конкретном условии \mathbf{W}_R восстанавливающий оператор $R(\mathbf{k})$ аппроксимируется аналитической формулой

$$R(\mathbf{k}) = R(\mathbf{k}, \mathbf{a}), \quad (3)$$

связанной с некоторым набором параметров, обозначенным многомерным вектором \mathbf{a} . В результате предварительного моделирования строится зависимость $\mathbf{a}(\mathbf{W}_R)$.

В процессе обработки экспериментальной информации для каждого изображения (или его фрагмента) определяется \mathbf{W}_R , а затем рассчитывается вектор $\mathbf{a}(\mathbf{W}_R)$ и строится восстанавливающий в виде аналитической функции оператор $R(\mathbf{k}, \mathbf{a})$.

Аналитическую аппроксимацию восстанавливающего оператора $R(\mathbf{k})$ в полярных координатах (k, φ) можно представить, например, в виде функции (Бондур и др., 2016а, б):

$$R(\mathbf{k}, \mathbf{a}) = a_0 (\exp(a_4 k^{a_5})) \times ((\cos(\varphi - \varphi_c))^{a_3} k^{a_1 + a_2 \cos(\varphi - \varphi_c)}), \quad (4)$$

где $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ – вектор параметров аппроксимации, зависящих от условий формирования поля яркости морской поверхности; a_0 – постоянная.

Параметры вектора \mathbf{a} имеют различный физический смысл (Бондур и др., 2016).

Параметры a_1, a_2, a_3 в формуле (4) характеризуют высокочастотную область степенного спада

спектральной плотности волнения (Мурынин, 1991). Такое представление позволяет изучать искажения показателей степенных аппроксимаций спектров уклонов морского волнения для различных направлений распространения волн. Значения параметров a_1, a_2, a_3 для типичных условий спутниковой съемки высокого разрешения при различных положениях Солнца могут быть получены численным методом (Бондур, 2000а, б; Бондур, Мурынин, 1991, 2015; Мурынин, 1990, 1991).

Параметры a_4, a_5 в формуле (4) описывают восстанавливающий фильтр в области низких пространственных частот. Значения этих параметров были получены путем сопоставления результатов дистанционных и контактных измерений спектров волнения и минимизации их отклонений (Бондур и др., 2016).

Данный подход и предложенный базовый метод использовались для построения алгоритма обработки потоков космических данных.

ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТИ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Алгоритм параллельной обработки

При исследовании спектров пространственно-неоднородного волнения космические изображения необходимо разделить на фрагменты, с учетом характерных масштабов изучаемых явлений. Обычным подходом является разбиение изображения на равные квадратные фрагменты с возможностью их частичного перекрытия.

В принципе, разделение больших изображений на фрагменты с перекрытием и последующая их обработка с вычислением пространственных спектров возможна с использованием существующих программных средств обработки данных дистанционного зондирования, таких как программное обеспечение, описанное в работах (Бондур, 2014; Бондур, Старченков, 2001), а также ENVI/IDL (*ENVI – Environment for Visualizing Images*), ERDAS Imagine (*ERDAS Imaging 2018 Release guide*).

Однако такая обработка имеет некоторые существенные недостатки, особенно при мониторинге обширных акваторий, в том числе:

- крайне низкое быстродействие при анализе потоков изображений;
- большое количество накладных расходов вычислительной мощности;
- невозможность полного распараллеливания из-за наличия последовательных операций.

Для устранения указанных недостатков разработаны специальные подходы к разработке алгоритма обработки. Разделение больших космических изображений на фрагменты (тайлы) позволяет производить обработку этих тайлов параллельно. Предлагаемый алгоритм параллельной обработки



Рис. 1. Блок-схема алгоритма параллельной обработки космических изображений морской поверхности и регистрации пространственных спектров волнения.

тайлов заключается в выполнении следующей последовательности действий:

1) открыть изображение и считать сопроводительную информацию.

2–3) считать тайл изображения заданного размера из заданного места на исходном космическом изображении и определить параметры условий формирования поля яркости в этом тайле, влияющие на параметры нелинейного восстанавливающего оператора и скопировать тайл в память GPU;

4) применить преобразование Фурье к каждому фрагменту изображения и вычислить двумерный пространственный спектр фрагмента изображения, который для краткости будем называть спектром тайла изображения;

5) получить нелинейный восстанавливающий оператор в виде пространственочастотного филь-

тра $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$, зависящего от условий формирования изображения по формуле (3);

6) применить нелинейный восстанавливающий фильтр $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$ к спектру тайла изображения морской поверхности и получить спектр уклонов морской поверхности:

$$\Phi(\mathbf{k}) = \mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})S(\mathbf{k}); \quad (5)$$

7) рассчитать характеристики спектра уклонов морской поверхности, в том числе параметр p степенной аппроксимации

$$\Phi(\mathbf{k}) \sim k^{-p}; \quad (6)$$

8) сохранить полученные значения характеристик спектров в векторный файл в формате SHP (шейп-файл);

9) вывести полученный шейп-файл.

При этом шаги 2–7 описанного алгоритма производятся параллельно для всех имеющихся тайлов с использованием всех доступных ядер процессоров.

Особенности программной реализации алгоритма

Для реализации описанного алгоритма разработан программный модуль на языке C++, позволяющий работать с форматами входных изображений TIFF, GeoTIFF. Параллельность вычисления реализуется с использованием спецификации OpenMP (The OpenMP, 2019).

Программный модуль поддерживает многоядерные процессоры и содержит в себе оптимизированные функции для обработки мультимедийных данных.

Блок-схема алгоритма параллельной обработки космических изображений приведена на рис. 1.

При разработке программного модуля использованы библиотеки:

– OpenCV, библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом, реализована на C/C++ (Open Source, 2019);

– Intel IPP (Intel Integrated Performance Primitives), которая содержит наиболее эффективную реализацию быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT) для процессоров Intel, на которых и тестировался данный код (Intel, 2019);

– GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) – библиотека для чтения и записи растровых и векторных гео-пространственных форматов данных, которая отвечает за работу с форматом GeoTIFF, который позволяет хранить изображения очень большого размера, считывать, записывать фрагменты изображения, работать с геопривязкой (Geospatial, 2019).

Код разработанного программного модуля имеет две реализации:

- стандартную реализацию, работающую на стандартном центральном процессоре;
- реализацию высокопроизводительного модуля регистрации спектров, основанную на использовании программно-аппаратной архитектуры параллельных вычислений CUDA с использованием графических процессоров (CUDA, 2019).

При автоматизированной обработке изображений большого размера могут возникать трудности, связанные с дальнейшим анализом и представлением полученных данных. Для эффективного анализа результатов обработки необходимо удобное представление полученных массивов информации. Предлагаемым подходом является автоматическое представление результатов обработки изображений в формате, допускающем быстрый просмотр результатов. При этом важное значение имеет возможность визуального представления информации, позволяющего охватить большие объемы данных с учетом их многообразия. Удобной формой такого представления является формат презентации PowerPoint (Microsoft PowerPoint, 2019). Формат PowerPoint предназначен для создания презентаций с использованием упорядоченного набора слайдов, иллюстрирующего результаты обработки потоков информации, поступающей на вход исследовательской программы.

В созданной исследовательской программе реализована возможность автоматического создания презентации в формате PowerPoint по результатам параллельной обработки потоков фрагментов спутниковых изображений морского волнения. Для построения презентаций большого объема разработан скрипт на встроенном в PowerPoint языке программирования Visual Basic, включающем интегрированную среду разработки программного обеспечения (Visual Basic, 2019).

С точки зрения изучения развития поверхностного волнения на обширных акваториях представляет интерес формирование и представление выходных данных презентации следующего состава:

- исходное изображение тайла;
- спектр изображения;
- спектр уклонов морской поверхности, восстановленный с применением нелинейного оператора;
- спектр уклонов морской поверхности, прошедший медианную фильтрацию изображения для лучшего визуального представления;
- одномерный разрез спектра уклонов в заданном направлении, либо интегральный одномерный спектр уклонов в заданном диапазоне углов;

– представление пространственного распределения информационных продуктов для каждого фрагмента в пределах исследуемой акватории.

Пример фрагмента презентации проведен на рис. 2 (обрабатываемое изображение имеет размер 108294×28236 пикселей и разрядность 16 bit).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для оценки эффективности предложенного алгоритма распараллеливания при проведении обработки проводилось тестирование времени выполнения операций и вычислялись значения таких характеристик, как *ускорение* и *эффективность*.

В качестве *ускорения* есть отношение времени выполнения вычислений на одном потоке T_1 , к времени выполнения тех же вычислений на p потоках T_p :

$$S = \frac{T_1}{T_p}. \quad (7)$$

Для оценки *эффективности* использовалось отношение:

$$E = \frac{S}{p}, \quad (8)$$

где: S – ускорение; p – количество потоков.

Для того чтобы оценить ускорение и эффективность созданной исследовательской программы, мы проводили тестовые вычисления с использованием настольного компьютера стандартной конфигурации, имеющий 4-ядерный центральный процессор Intel Core i5-3470 с частотой 4 GHz. Для тестирования CUDA-версии программы использовался графический процессор NVidia GeForce RTX 2060 с рабочей частотой 1700 GHz и объемом памяти 6 GB GDDR6, содержащий 920 ядер CUDA.

Данные по ускорению и эффективности, полученные при обработке тестового космического изображения, приведены в табл. 1. Оценки ускорения и эффективности на центральном процессоре выполнялись с использованием от 1 до 4 ядер.

Оценки получены при размере тайла 2048×2048 пикселей. При уменьшении и при увеличении размера тайла наблюдается увеличение времени обработки.

При тестировании CUDA-версии программы оценки ускорения и эффективности по приведенным формулам не проводились в силу специфики технологии CUDA. При этом для оценки эффекта от применения данной технологии сравнивалось время вычислений при обработке тестового изображения ЦПУ-версией программы при максимальном количестве потоков и CUDA-версией программы. Такое сравнение показало, что

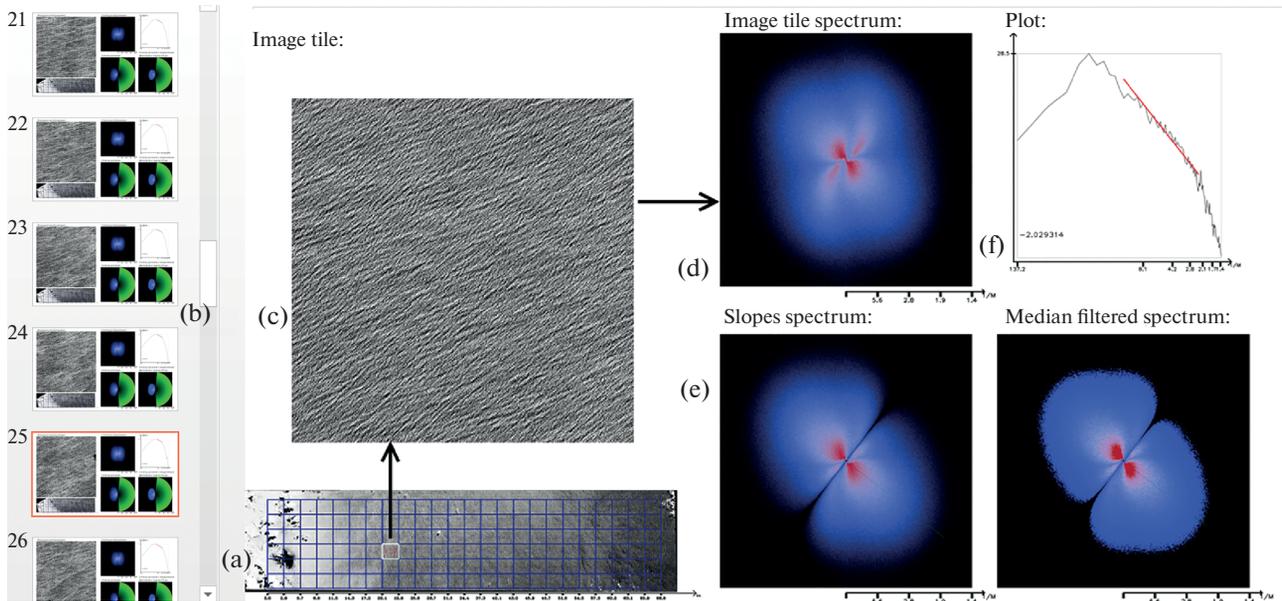


Рис. 2. Пример обработки космического изображения в автоматическом режиме – страница презентации с результатами обработки одного тайла размером 2048×2048 : *a* – панорама исходного большого спутникового изображения высокого разрешения; *b* – лента последовательности слайдов в формате Powerpoint, сформированная исследовательской программой; *в* – выделенный и обработанный фрагмент изображения (тайл); *г* – пространственный спектр выделенного фрагмента; *д* – слева – восстановленный спектр уклонов, справа – тот же спектр, с которым проведена медианная фильтрация с ядром 11 пикселей для лучшей визуализации; *е* – график интегрального восстановленного спектра уклонов в выделенном угловом секторе.

CUDA-версия программы справляется с обработкой тестового изображений в среднем в 2.57 раза быстрее, чем ЦПУ-версия, работающая с максимальным ускорением. Таким образом, CUDA-версия программы позволяет обрабатывать изображений более чем в 12 раз быстрее, чем это делает программа без распараллеливания вычислительных потоков.

Таким образом, при использовании настольного компьютера со стандартными характеристиками CUDA реализация программного модуля позволяет проводить обработку изображений приблизительно в 2.57 раза быстрее ЦПУ версии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА НА МОДЕЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Тестирование проводилось на модельных изображениях, синтезированных методами, опи-

санными, как пример в работах (Бондур, 2000а, б; Бондур и др., 2003). Поскольку спектры морского волнения аппроксимируются степенным знаком (6), то использовались модельные изображения, полученные при различных значениях степенных показателей p пространственных спектров возвышений морской поверхности. Для создания тестового набора изображений задавались следующие значения степенных показателей p пространственных спектров возвышений морской поверхности: 3.3; 3.6; 4; 4,5; 5. Для более широкого охвата условий волнообразования использовались различные значения скорости ветра: 5; 7; 10; 15; 20 м/с.

Примеры синтезированных изображений приведены на рис. 3.

При обработке тестовых изображений, показанных на рис. 3, с использованием предложенного алгоритма получились восстановленные пространственные спектры возвышений морской

Таблица 1. Значения ускорения и эффективности для ЦПУ версии исследовательской программы

Количество потоков	Эффективность, %	Ускорение
1	100	1
2	100	1.99
4	95.5	3.82
8	62.5	5

поверхности, допускающие степенную аппроксимацию с параметрами p , отличающимися от значений, заданных при синтезе модельных изображений, не более чем на 1%. Это свидетельствует о том, что предложенный алгоритм с хорошей точностью восстанавливает характеристики пространственных спектров морской поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА И ИХ АНАЛИЗ

Приведем примеры исследования изменчивости пространственных спектров уклонов и возвышений морской поверхности с использованием характеристик, определяемых с использованием разработанного метода и его программной реализацией. В ходе исследований определились следующие характеристики пространственных спектров волнения:

- параметры степенной аппроксимации одномерных разрезов двумерных спектров уклонов морской поверхности для заданных направлений;
- параметры степенной аппроксимации одномерных интегральных спектров уклонов морской поверхности в заданном диапазоне волновых азимутов;
- форма двумерных спектров уклонов морской поверхности, характеризующая распределение волновой энергии между различными группами поверхностных волн.

Для исследования изменчивости двумерных спектров уклонов и возвышений морской поверхности использовались изображения, полученные с борта спутника Ресурс-П в различных акваториях:

- в акватории Черного моря у берегов Крыма и Краснодарского края (Бондур и др., 2016а, б, 2017а, б, 2018);
- в акватории Тихого океана у берегов острова Оаху (Гавайские острова, США) (Бондур, 2004; Бондур и др., 2006б, 2007, 2008б, 2009, 2013; Bondur, 2005, 2011; Bondur, Tsidilina, 2005).

Рассмотрим пример изменчивости спектров волнения, выявленных по восстановленным пространственным спектрам уклонов и возвышений морской поверхности на основании изображений, полученных 4 августа 2017 г. в 14:09 по местному времени (11:09 GMT) с помощью оптической аппаратуры Геотон спутника Ресурс-П в акватории Черного моря вблизи города Севастополь.

Для исследования изменчивости спектров в различных диапазонах обработка проводилась при различных размерах обрабатываемых фрагментов изображения. Приведем пример с размером фрагмента 2048×2048 пикселей, соответствующим размеру исследуемых участков морской поверхности 1455×1455 м.

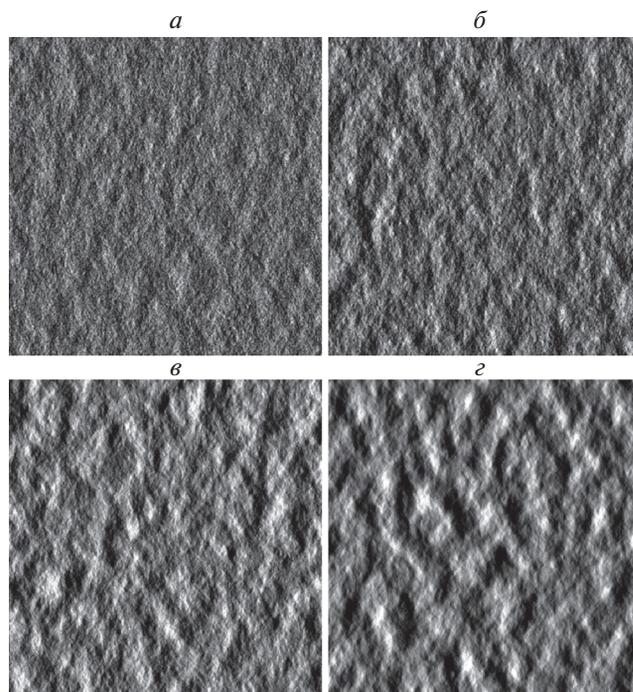


Рис. 3. Модельные изображения морской поверхности с различными значениями степенного показателя пространственного спектра возвышений p : $a - p = 3.6$, $б - p = 4.0$, $в - p = 4.5$, $г - p = 5.0$. При синтезе изображений задавалась скорость приповерхностного ветра 15 м/с.

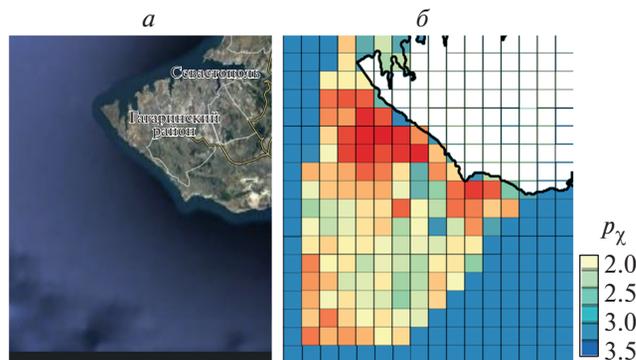


Рис. 4. Пример оперативного анализа изменчивости морского волнения разработанным исследовательским программным модулем у побережья Крыма вблизи города Севастополь: a – фрагмент карты Google Earth; $б$ – пространственное распределение значений параметра степенной аппроксимации разреза спектра уклонов (размер фрагмента изображения 2048×2048 пикселей).

Области, выделенные различными цветами на рис. 4, имеют отличающиеся значения степенного показателя p_χ интегрального спектра возвышений морской поверхности в диапазоне длин волн 4–10 м. Степенные показатели p_χ интегрального спектра возвышений морской поверхности были получены из степенных показателей p_s интеграль-

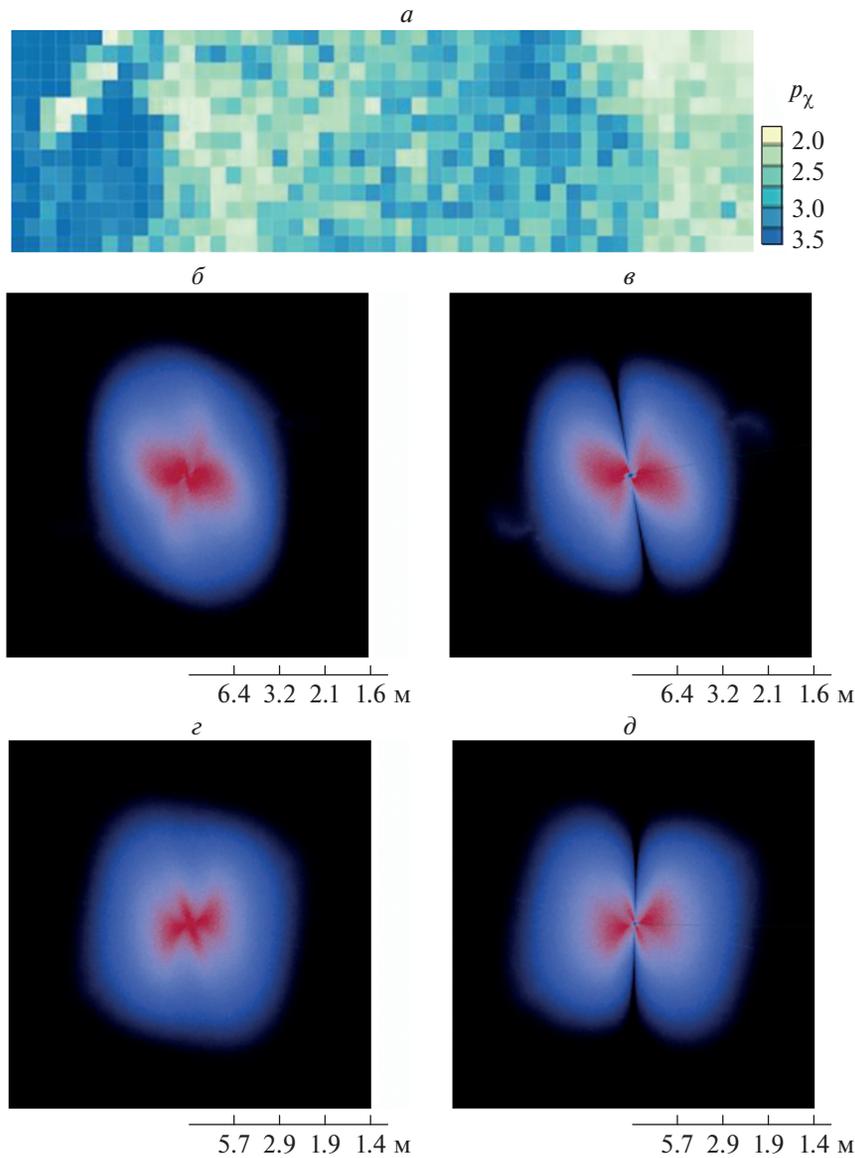


Рис. 5. Пример оперативного анализа изменчивости волнения в океанской акватории вблизи острова Оаху: *a* – визуализация восстановленных степенных показателей (наклонов) интегральных пространственных спектров уклонов океанских волн; *б* – спектр фрагмента изображения волн зыби со слабым ветровым волнением (08.06.2019); восстановленный спектр уклонов по фрагменту *б*; *г* – спектр фрагмента изображения смешанной системы волн (28.07.2019); *д* – восстановленный спектр уклонов по фрагменту *г*.

ного спектра уклонов с помощью оценочной формулы

$$p_\chi = p_s + 2,$$

вытекающей из соотношения, связывающего спектры уклонов и возвышений морской поверхности множителем, пропорциональным квадрату модуля волнового вектора (Мурынин 1990). Чтобы облегчить интерпретацию показателей спектров, целесообразно учесть известное соотношение, связывающее показатели пространственных (p_χ) и частотных (p_ω) спектров возвышений (Бондур и др., 2016)

$$p_\chi = (p_\omega + 1) / 2.$$

Таким образом, равновесному спектру Филлипса (Филлипс 1980) соответствует $p_\omega = 5$ и $p_\chi = 3$, а известной аппроксимации Тоба (Toba, 1973) соответственно $p_\omega = 4$ и $p_\chi = 2.5$. Показатели изменяются в интервале от $p_\chi = 2$ до $p_\chi = 3.5$, который включает обе цитируемые аппроксимации.

В качестве примера применения разработанных алгоритмов и исследовательского программного модуля для обширных океанских акваторий приведем некоторые результаты, демонстрирующие возможности исследования изменчивости

характеристик пространственных спектров океанского волнения при наличии различных волновых систем, ветрового волнения и волн зыби. Такие исследования проводились в океанской акватории вблизи острова Оаху в 2019 году с использованием данных, полученных со спутника “Ресурс-П”.

На рис. 5 приведен пример панорамы восстановленных степенных показателей интегральных пространственных спектров уклонов океанских волн в бухте Мамала в диапазоне расстояний 4–40 км от берега. Там же приведены примеры спектров фрагментов изображений, полученных в этой акватории 8 июня и 28 июля 2019 года, и восстановленных по этим фрагментам спектр уклонов различных волновых систем – волн зыби со слабым ветровым волнением и смешанной системы волн, состоящей из развивающегося ветрового волнения и волн зыби.

В океанской акватории вблизи острова Оаху были проведены комплексные эксперименты по адаптации разработанных методов и алгоритмов восстановления пространственных спектров волнения в океанских условиях. Результаты этих исследований будут опубликованы авторами в отдельной работе в ближайшее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, основным результатом работы является разработка высокопроизводительного метода, алгоритмов и исследовательского программного обеспечения для регистрации спектров морской поверхности по космическим изображениям, которые могут применяться для решения задач оперативной океанографии, в интересах охраны окружающей среды и рационального природопользования акваторий морей и океанов, в том числе с использованием многоспутниковых систем космического мониторинга, основы построения которых разрабатываются в настоящее время.

Продемонстрирована целесообразность применения используемого подхода и разработанных алгоритмов для увеличения вычислительной производительности при решении задач регистрации спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений. Проведенные вычислительные эксперименты показали значительное увеличение производительности регистрации спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений за счет распараллеливания вычислений – в 5 раз при использовании только центрального процессора стандартного настольного компьютера и более чем в 12 раз при использовании графического процессора с технологией CUDA.

Результаты работы могут быть использованы при создании программного обеспечения многопроцессорных аппаратно-программных комплексов, создаваемых для оперативного мониторинга процессов и явлений, происходящих в различных акваториях мирового океана по данным, поступающим с космических и авиационных носителей, и предназначенных для обработки данных дистанционного зондирования океанских акваторий в масштабе времени, близком к реальному.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0306).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии. / В кн. “Новые идеи в океанологии. М.: Наука. Т. 1: Физика. Химия. Биология, 2004. С. 55–117.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2000а. № 5. С. 16–27.
- Бондур В.Г.* Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры методом фазового спектра // Исслед. Земли из космоса. 2000б. № 5. С. 28–44.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
<https://doi.org/10.7868/S0205961414010035>
- Бондур В.Г., Аржененко Н.И., Линник В.Н., Титова И.Л.* Моделирование многоспектральных аэрокосмических изображений динамических полей яркости // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 2. С. 3–17.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.Н., Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В., Хурчак А.П., Гринченко Д.В.* Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исслед. Земли из космоса. 2017а. № 6. С. 3–22.
<https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И.* Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1. Механизм генерации внутренних волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 833–845.

- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Морозов Е.Г.* Регистрация из космоса и моделирование коротких внутренних волн в прибрежных зонах океана // Докл. АН. 2008а. Т. 418. № 4. С. 543–548.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008б. Т. 48. № 5. С. 661–671.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.
- Бондур В.Г., Дулов В.А., Мурынин А.Б., Игнатъев В.Ю.* Восстановление спектров морского волнения по спектрам космических изображений в широком диапазоне частот // Физика атмосферы и океана. 2016а. Т. 52. № 6. С. 716–728.
<https://doi.org/10.7868/S0002351516060055>
- Бондур В.Г., Дулов В.А., Мурынин А.Б., Юровский Ю.Ю.* Исследование спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по спутниковым и контактными данным // Исслед. Земли из космоса. 2016б. № 1–2. С. 7–24.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416010048>
- Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В.* Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006 а. Т. 46. № 6. С. 805–820.
- Бондур В.Г., Замишина А.Ш.* Исследование высокочастотных внутренних волн на границе шельфа по спектрам космических оптических изображений // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофото-съемка. 2008. № 1. С. 85–96.
- Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
- Бондур В.Г., Иванов В.А., Фомин В.В.* Особенности распространения загрязненных вод из подводного источника в стратифицированной среде прибрежной акватории // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 453–461.
<https://doi.org/10.1134/S0002351518040053>
- Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И.* Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006б. № 6. С. 42–49.
- Бондур В.Г., Мурынин А.Б.* Восстановление спектров поверхностного волнения по спектрам изображений с учетом нелинейной модуляции поля яркости // Оптика атмосферы и океана. 1991. Т. 4. № 4. С. 387–393.
- Бондур В.Г., Мурынин А.Б.* Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 3–14.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415060020>
- Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских волн на Гавайском шельфе // Докл. АН. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104.
<https://doi.org/10.7868/S0869565213130173>
- Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на российском шельфе Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017б. Т. 53. № 1. С. 135–142.
<https://doi.org/10.7868/S0002351516050035>
- Бондур В.Г., Савин А.И.* Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 24–33.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофото-съемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., Долотов Ю.С., Здорovenнов Р.Э., Петров М.П., Цидилина М.Н.* Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамаля, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
- Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики пенных образований на взволнованной морской поверхности // Океанология. 1982. Т. 22. № 3. С. 372–379.
- Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики элементов линейной геометрии пенных структур на поверхности моря по данным оптического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 4. С. 21–31.
- Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. Издательство БХВ-Петербург, 2002. 609 с.
- Ивонин Д.В., Иванов А.Ю.* О классификации пленочных загрязнений моря на основе обработки поляризационных радиолокационных данных спутника TerraSAR-X // Океанология. 2017. Т. 57. № 5. С. 815–829.
<https://doi.org/10.7868/S003015741705015X>
- Мурынин А.Б.* Восстановление пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям в нелинейной модели поля яркости // Исслед. Земли из космоса, 1990. № 6. С. 60–70.
- Мурынин А.Б.* Параметризация фильтров, восстанавливающих пространственные спектры уклонов морской поверхности по оптическим изображениям // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 5. С. 31–38.
- Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 319 с.
- Bondur V.G.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7p.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book Waste Water – Evaluation and Management, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180.
<http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
- Bondur V.G., Tsidilina M.* Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas //

31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.

Bondur V.G., Zamshin V.V. Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas, in book K.V. Anisimov et al. (eds.), Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”, 2018. P. 625–637. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>.

CUDA parallel computing. Available at: <https://developer.nvidia.com/cuda-zone> (accessed 19.09.2019)

ENVI – Environment for Visualizing Images. Available at: http://www.harrisgeospatial.com/docs/using_envi_Home.html. (accessed 19.09.2019)

ERDAS Imaging 2018 Release guide. Available at: <https://www.hexagongeospatial.com/technical-documents/release-guides-2018/erdas-imagine-2018-release-guide>. (accessed 19.09.2019)

Geospatial Data Abstraction Library. Available at: <https://www.gdal.org> (accessed 19.09.2019)

Intel Integrated Performance Primitives. Available at: <https://software.intel.com/en-us/intel-ipp> (accessed 19.09.2019).

Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004. P. 53–58.

Microsoft PowerPoint. Available at: <https://products.office.com/ru-ru/powerpoint> (accessed 19.09.2019)

Open Source Computer Vision Library. Available at: <https://opencv.org> (accessed 19.09.2019)

The OpenMP API specification for parallel programming. Available at: <https://www.openmp.org> (accessed 19.09.2019)

Toba J. Local balance in the air-sea boundary process // *Oceanogr. Soc. Japan*. 1973. V. 29. P. 209–225.

Visual Basic. Available at: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/visual-basic/> (accessed 19.09.2019)

Yurovskaya M.V., Dulov V.A., Chapron B., Kudryavtsev V.N. Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. № 9. P. 4380–4394. <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrc.20296>

High-Performance Registration of Sea Wave Spatial Spectra During On-Line Monitoring of Vast Water Areas

V. E. Vorobyev¹, A. B. Murynin¹, and K. S. Khachatryan¹

¹*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia*

Here we describe high-performance methods for sea surface spectra registration using satellite imagery to solve oceanographic tasks. Algorithms and research software were developed to implement the methods for urgent retrieval of marine surface characteristics using satellite imagery. The developed algorithms were tested and their performance was estimated using experimental data. The developed software is for the work with multi-core processors. Numerical studies have allowed us to find out that the software retrieves spectra of sea surface slopes and elevations using the developed high-performance methods with errors no more than 1%. The conducted numerical experiments have shown significant increase of performance of sea surface slope and elevation spectra registration due to parallel computations. The performance increases 5-fold when only the central processing unit of a standard desktop PC is used and more than 12-fold when a CUDA-enabled graphics processing unit is used. The examples of implementation of the developed algorithms to monitor vast water areas of the Black Sea and the Pacific are given here.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, sea waves, wave spectra, satellite imagery, high-performance processing, parallel computations

REFERENCES

- Bondur V.G.* Aerokosmicheskie metody v sovremennoy okeanologii [Aerospace methods in modern oceanology] // *New Ideas in Oceanology*. V. 1. Physics. Chemistry. Biology. Moscow: Nauka. 2004. P. 55–117 (In Russian).
- Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. doi: 10.1134/S0001433811090039.
- Bondur V.G.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
- Bondur V.G.* Metody modelirovaniya poley izlucheniya na vkhode aerokosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya [The Methods of the Emission Model Field which Be Formed on Enter of Airspace Remote Sensing System] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 2000a. № 5. P. 16–27 (In Russian).
- Bondur V.G.* Modelirovanie dvumernykh sluchaynykh poley yarkosti na vkhode aerokosmicheskoy apparatury metodom fazovogo spektra [Phase-Spectral Method’s Modeling of Two-Dimension Stochastic Brightness Field Formed at the Airspace Apparatus Entrance] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*, 2000b. № 5. P. 28–44 (In Russian).
- Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. doi: 10.1134/S0001433814090060.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book *Waste Water – Evaluation and Management*, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite->

monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-run-off-turbulent-jets-in-coastal-water-areas.

Bondur V.G., Arzhenenko N.I., Linnik V.N., Titova I.L. Modelirovanie mnogospektralnykh aerokosmicheskikh izobrazheniy dinamicheskikh poley yarkosti [The Simulation of Multispectral Air-Space Images of Dynamic Brightness Fields] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*, 2003. № 2. P. 3–17 (In Russian).

Bondur V.G., Dulov V.A., Murynin A.B., Ignatiev V.Yu. Retrieving sea-wave spectra using satellite-imagery spectra in a wide range of frequencies // *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. a. V. 52. № 6. P. 637–648. doi: 10.1134/S0001433816060049.

Bondur V.G., Dulov V.A., Murynin A.B., Yurovsky Yu.Yu. A study of sea-wave spectra in a wide wavelength range from satellite and in-situ data // *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 888–903. doi: 10.1134/S0001433816090097.

Bondur V.G., Filatov N.N., Grebenyuk Yu.V., Dolotov Yu.S., Zdrovennov R.E., Petrov M.P., Tsidilina M.N. Studies of hydrophysical processes during monitoring of the anthropogenic impact on coastal basins using the example of Mamala Bay of Oahu Island in Hawaii // *Oceanology*. 2007. V. 47. № 6. P. 769–787. doi: 10.1134/S0001437007060033.

Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Ezhova E.V., Kazakov V.I., Sergeev D.A., Soustova I.A., Troitskaya Yu.I. Surface manifestations of internal waves investigated by a subsurface buoyant jet: 1. The Mechanism of Internal-Wave Generation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009. V. 45. № 6. P. 779–790. doi: 10.1134/S0001433809060115.

Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Morozov E.G. Satellite recording and modeling of short internal waves in coastal zones of the ocean // *Doklady Earth Sciences*. 2008a. V. 418. № 1. P. 191–195. doi: 10.1134/S1028334X0801042X.

Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D. The spectral characteristics and kinematics of short-period internal waves on the Hawaiian shelf // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009. V. 45. № 5. P. 598–607. doi: 10.1134/S0001433809050077.

Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D. Variability of internal tides in the coastal water area of Oahu Island (Hawaii) // *Oceanology*. 2008b. V. 48. № 5. P. 611–621. doi: 10.1134/S0001437008050019.

Bondur V.G., Ivanov V.A., Fomin V.V. Peculiarities of polluted water spreading from a submarine source in stratified coastal environment // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. № 4. P. 386–393. doi: 10.1134/S0001433818040205

Bondur V.G., Keeler R.N., Starchenkov S.A., Rybakova N.I. Monitoring zagryazneniy pribrezhnykh akvatoriy s ispolzovaniem mnogospektralnykh sputnikovyykh izobrazheniy vysokogo prostanstvennogo razresheniya [Monitoring of the pollution of the ocean coastal water areas using space multispectral high resolution imagery] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 2006a. № 6. P. 42–49 (In Russian).

Bondur V.G., Murynin A.B. Methods for retrieval of sea wave spectra from aerospace image spectra // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 877–887. doi: 10.1134/S0001433816090085.

Bondur V.G., Murynin A.B. Vosstanovlenie spektrov poverkhnostnogo volneniya po spektram izobrazheniy s uchetom nelineynoy modulyatsii polya yarkosti [Resto-

ration of surface waves spectra from the spectra of images with the account for nonlinear modulation of the brightness field] // *Optika atmosfery i Okeana*. 1991. V. 4. № 4. P. 387–393 (In Russian).

Bondur V.G., Sabinin K.D., Grebenyuk Yu.V. Anomalous Variation of the Ocean’s Inertial Oscillations at the Hawaii Shelf // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 450. Part 1. P. 526–530. doi: 10.1134/S1028334X13050012.

Bondur V.G., Sabinin K.D., Grebenyuk Yu.V. Characteristics of inertial oscillations according to the experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. № 1. P. 120–126. doi: 10.1134/S0001433816050030.

Bondur V.G., Savin A.I. Modelling of signals on input to remote sensing equipment of aerospace environment monitoring systems // *Earth Obs. Rem. Sens*. 1996. V. 13. P. 539–553.

Bondur V.G., Sharkov E.A. Statisticheskie kharakteristiki elementov lineynoy geometrii pennykh struktur na poverkhnosti morya po dannym opticheskogo zondirovaniya [Statistical characteristics of foam formations on a disturbed sea-surface] // *Okeanologiya*. 1982. V. 22. № 3. P. 372–379. (In Russian).

Bondur V.G., Sharkov E.A. Statisticheskie kharakteristiki elementov lineynoy geometrii pennykh struktur na poverkhnosti morya po dannym opticheskogo zondirovaniya [Statistical characteristics of linear elements of foam formations on the sea-surface as derived from optical sounding data] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 1986. № 4. P. 21–31 (In Russian).

Bondur V.G., Starchenkov S.A. Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2001. № 3. P. 118–143 (In Russian).

Bondur V.G., Tsidilina M. Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.

Bondur V.G., Vorobjev V.E., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N. Study of fields of currents and pollution of the coastal waters on the Gelendzhik Shelf of the Black Sea with space data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49. № 9. P. 886–896. doi: 10.1134/S000143381309003X.

Bondur V.G., Vorobyev V.E., Zamshin V.V., Serebryany A.N., Latushkin A.A., Li M.E., Martynov O.V., Hurchak A.P., Grinchenko D.V. Monitoring anthropogenic impact on some coastal water areas of the Black Sea using multispectral satellite imagery // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018. V. 54. № 9. P. 1008–1022. doi: 10.1134/S0001433818090098.

Bondur V.G., Zamshin V.V. Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas, in book K.V. Anisimov et al. (eds.), *Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”*, 2018. P. 625–637. doi: 10.1007/978-3-319-62870-7.

Bondur V.G., Zamshina A.Sh. Issledovanie vysokochastotnykh vnutrennikh voln na granitse shelfa po spektram kosmicheskikh opticheskikh izobrazheniy [Investigation of high-frequency internal waves at the shelf boundary by the

- spectra of space optical images] // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Geodesy and Aerophotography*. 2008. № 1. P. 85–96 (In Russian).
- Bondur V.G., Zhurbas V.M., Grebenyuk Yu.V.* Mathematical Modeling of Turbulent Jets of Deep-Water Sewage Discharge into Coastal Basins // *Oceanology*. 2006b. V. 46. № 6. P. 757–771. doi: 10.1134/S0001437006060014.
- Bondur V.G., Zubkov E.V.* Vydelenie melkomasshtabnykh neodnorodnostey opticheskikh kharakteristik verkhnego sloya okeana po mnogoazonalnym sputnikovym izobrazheniyam vysokogo razresheniya. Chast 1. Effekty sbrosa drenazhnykh kanalov v pribrezhnye akvatorii [Showing up the small-scale ocean upper layer optical inhomogeneities by the multispectral space images with the high surface resolution. Part 1. The canals and channels drainage effects at the coastal zone] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2005. № 4. P. 54–61. (In Russian). CUDA parallel computing. Available at: <https://developer.nvidia.com/cuda-zone> (accessed 19.09.2019).
- ENVI – Environment for Visualizing Images. Available at: http://www.harrisgeospatial.com/docs/using_envi_Home.html. (accessed 19.09.2019).
- ERDAS Imaging 2018 Release guide. Available at: <https://www.hexagongeospatial.com/technical-documents/release-guides-2018/erdas-imagine-2018-release-guide>. (accessed 19.09.2019).
- Fillips O.M.* Dinamika verkhnego sloya okeana [The Dynamics of the Upper Ocean]: Transl. from Engl. Moscow: Mir, 1980. 319 p. (In Russian).
- Geospatial Data Abstraction Library. Available at: <https://www.gdal.org> (accessed 19.09.2019).
- Intel Integrated Performance Primitives. Available at: <https://software.intel.com/en-us/intel-ipp> (accessed 19.09.2019).
- Ivonin D.V., Ivanov A.Y.* On classification of sea surface oil films using TerraSAR-X satellite polarization data // *Oceanology*. 2017. V. 57. № 5. P. 738–750. doi: 10.1134/S0001437017040099
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April. 2004. P. 53–58.
- Microsoft PowerPoint. Available at: <https://products.office.com/ru-ru/powerpoint> (accessed 19.09.2019).
- Murynin A.B.* Parametrizatsiya filtrov, vosstanavlivayushchikh prostranstvennyye spektry uklonov morskoy poverkhnosti po opticheskim izobrazheniyam [Parameterization of filters restoring the spatial spectra of sea surface slopes from optical images] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 1991. № 5. P. 31–38.
- Murynin A.B.* Vosstanovlenie prostranstvennykh spektrov morskoy poverkhnosti po opticheskim izobrazheniyam v nelineynoy modeli polya yarkosti [Retrieving spatial spectra of the sea surface from optical images in a nonlinear brightness field model] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 1990. № 6. P. 60–70 (In Russian).
- Open Source Computer Vision Library. Available at: <https://opencv.org> (accessed 19.09.2019)
- The OpenMP API specification for parallel programming. Available at: <https://www.openmp.org> (accessed 19.09.2019).
- Toba J.* Local balance in the air-sea boundary process // *Oceanogr. Soc. Japan*. 1973. V. 29. P. 209–225.
- Visual Basic. Available at: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/visual-basic/> (accessed 19.09.2019).
- Voevodin V.V., Voevodin V.I.* Parallelnye vychisleniya (Parallel computations. BKHV-Petersburg Publ., 2002. 609 p.
- Yurovskaya M.V., Dulov V.A., Chapron B., Kudryavtsev V.N.* Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. № 9. P. 4380–4394. <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrc.20296>