
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ
ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОГО МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ
ПРИ КОСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ОБШИРНЫХ АКВАТОРИЙ**

© 2020 г. В. Е. Воробьев^{a, *}, А. Б. Мурынин^{a, b, **}

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

^bФедеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

**E-mail: amurynin@bk.ru

Поступила в редакцию 16.09.2020 г.

Анализируются возможности использования метода регистрации спектров пространственно-неоднородного морского волнения по космическим изображениям высокого пространственного разрешения при мониторинге обширных акваторий. Представлены результаты комплексных экспериментов по исследованию разработанного метода для оперативного восстановления пространственных спектров морского волнения по космическим изображениям для использования в акваториях со смешанным волнением, включающим ветровые волны в условиях большого разгона волнения и волны зыби. Проанализированы показатели степенной аппроксимации спектров пространственно-неоднородного волнения, восстановленных по космическим изображениям высокого пространственного разрешения, в зависимости от длины ветрового разгона на обширных акваториях. Установлено, что значения таких показателей для пространственных спектров возвышений морских волн наиболее сильно изменяются в прибрежной зоне. С увеличением расстояния от берега величины этих показателей приближаются к значению $p_\chi \approx 2.7$. В зоне ветровой тени на большом расстоянии от берега выявлено плавное снижение степенного показателя до значения $p_\chi \approx 2.5$, которое соответствовало известным аналитическим аппроксимациям.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, пространственно-неоднородное морское волнение, спектры волнения, восстанавливающие операторы, обработка изображений

DOI: 10.31857/S0205961420060068

ВВЕДЕНИЕ

Физические механизмы, ответственные за взаимодействия океана и атмосферы, зависят от различных факторов, в том числе таких, как скорость приповерхностного ветра, длина и продолжительность разгона поверхностных волн и др. (Давидан и др., 1985; Филлипс, 1980). Они влияют на пространственно-временную структуру поверхностного волнения и энергию волновых компонент (Полников, 2018; Трубкин, 2007). Поэтому важно производить их исследование, а также анализировать их изменения под воздействием различных причин. Для этого перспективно использование аэрокосмических методов и технологий, обеспечивающих регистрацию широкого спектра значимых параметров водной среды на обширных акваториях и в широком диапазоне пространственных масштабов (Бондур, 2004). Применение этих методов и технологий позволяет изучать различные процессы и явления на взволнованной морской поверхности и приповерх-

ностном слое, в том числе такие, как антропогенные и естественные воздействия на водную среду (Бондур и др., 2006, 2007, 2012; Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур, Зубков, 2005), проявления внутренних волн (Бондур и др., 2008, 2009, 2013), пенная активность (Бондур, Шарков, 1982), нефтегазопроявления (Бондур, 2010) и др.

К наиболее важным параметрам, характеризующим такие процессы и явления, относятся спектры поверхностного волнения (Давидан и др., 1985), которые могут регистрироваться дистанционными методами (Бондур, 2004). Для адекватной оценки спектров волнения в процессе аэрокосмического мониторинга морских акваторий, используются восстанавливающие операторы, представляющие собой функции, позволяющие получать спектры волнения из спектров полей яркости, регистрируемых по оптическим изображениям, получаемым с борта воздушных (Бондур, Мурынин, 1991) и космических носителей (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др., 2016а, б;

Yurovskaya 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, 2004; 2000а, б; Бондур, Мурынин, 1991, 2015).

Регистрация спектров волнения на обширных морских акваториях в области высоких пространственных частот может производиться с использованием спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др., 2020). Для обработки больших объемов данных, формируемых при космическом мониторинге таких акваторий, разработаны высокопроизводительные методы и алгоритмы восстановления спектров поверхностного волнения по оптическим изображениям высокого пространственного разрешения с применением нелинейных восстанавливающих операторов, действующих в параллельных вычислительных потоках (Бондур, Мурынин, 2015; Воробьев и др., 2020). Высокая вычислительная производительность достигается за счет распараллеливания вычислений с использованием всех доступных вычислительных ядер центрального и графического процессоров, что позволяет проводить обработку и первичный анализ результатов обработки данных по обширным океанским акваториям практически в реальном времени (Бондур, 2014; Воробьев и др., 2020).

В настоящей работе исследуются возможности метода восстановления спектров морского волнения по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения для космического мониторинга обширных акваторий в сложных условиях волнообразования при наличии смешанного волнения, включающего как ветровые волны, формируемые при длительном разгоне, так и волны зыби.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ДЛЯ ШИРОКОГО НАБОРА УСЛОВИЙ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ

При построении операторов, восстанавливающих спектры морского волнения по аэрокосмическим изображениям, учитывались физические механизмы, определяющие нелинейные искажения полей оптических сигналов, регистрируемых при их формировании (Бондур, 2004, 2000а, б; Бондур, Мурынин, 1991, 2015). Для аналитической аппроксимаций восстанавливающего оператора $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$ в полярных координатах (k, φ) использовалась функция (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др., 2016а; Мурынин, 1990, 1991)

$$\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a}) = a_0(\exp(a_4 k^{a_5})) \times ((\cos(\varphi - \varphi_c))^{a_3} k^{a_1 + a_2 \cos(\varphi - \varphi_c)}), \quad (1)$$

где $\mathbf{a}$ — вектор параметров аппроксимации, зависящих от условий формирования поля яркости морской поверхности;

$\mathbf{k}$ — волновой вектор;

$k = |\mathbf{k}|$ — модуль волнового вектора $\mathbf{k}$;

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 компоненты вектора $\mathbf{a}$;

a_4, a_5 — компоненты, описывающие восстанавливающий фильтр в области низких пространственных частот (Бондур и др., 2016а);

a_1, a_2, a_3 — компоненты, характеризующие область степенного спада спектральной плотности морского волнения и позволяющие учитывать искажения показателей степенных аппроксимаций спектров уклонов морского волнения для различных направлений распространения волн (Бондур, Мурынин, 2015), при этом:

a_1 — компенсирует нелинейные искажения показателя степенной аппроксимации спектра волнения для направления φ_c , которое соответствует горизонтальной проекции градиента интенсивности света, падающего на морскую поверхность;

a_2 — вносит поправку в значение параметра a_1 для направлений волн, отличающихся от φ_c , то есть определяет угловую зависимость показателя степенной функции спектра волнения;

a_3 — определяет угловую зависимость спектральной энергии.

Представление вида (1) позволяет изучать изменчивость показателей степенных аппроксимаций спектров уклонов морской поверхности для различных направлений распространения волн.

Для типичных условий спутниковой съемки высокого разрешения при различных положениях Солнца значения параметров a_1, a_2, a_3 были получены методом численного моделирования физических процессов формирования оптических изображений морской поверхности (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др., 2016а, б) с учетом подходов, разработанных в (Бондур, 2000а, б).

Формула (1) с учетом области низких пространственных частот получена методом численной оптимизации (Бондур и др., 2016а). Адекватность представления восстанавливающего оператора в виде (1) экспериментально апробирована с применением контактных данных, полученных с помощью решетки струнных волнографов, а также путем стереофотосъемки со стационарной океанографической платформы (Бондур и др., 2016б).

Проведенные исследования в океанской акватории позволили развить метод восстановления спектров морского волнения по спектрам оптических изображений высокого пространственно-

го разрешения, получаемых с борта различных космических аппаратов для широкого набора условий волнообразования (Бондур и др., 2020). Разработанный метод основан на использовании восстанавливающих операторов, формируемых в виде пространственно-частотных фильтров (1), параметры которых адаптировались применительно к конкретным условиям. Валидация метода проводилась путем сопоставления спектров морского волнения в диапазоне частот 0.29–0.59 Гц (длины длин волн 4.5–20 м), восстановленных по космическим изображениям высокого пространственного разрешения, полученным с борта спутников QuickBird и Ресурс-П, а также спектров волнения, зарегистрированных с помощью дрейфующих и заякоренных волновых буев в процессе проведения комплексных экспериментов в акваториях Тихого океана, проведенных в районе Гавайских островов в 2002–2005 гг. (Bondur, 2005, 2011; Keeler et al., 2005) и в 2019 гг. (Бондур и др., 2020).

На основании сопоставления космических данных с результатами измерений, выполненных с использованием волновых буев, в работе (Бондур и др., 2020) была получена поправка к параметру восстанавливающего пространственно-частотного фильтра в диапазоне степенного спада частотного спектра волнения. Значение этого параметра с учетом полученной поправки составило $a_1 = -0.05$ для сложных условий волнообразования, включающих длительный разгон, наличие системы волн, содержащей как ветровые волны, так и различные волны зыби.

В настоящей работе восстанавливающий оператор, адаптированный к сложным условиям волнообразования, использовался для изучения показателей степенной аппроксимации спектров пространственно-неоднородного волнения, восстановленных по космическим изображениям высокого пространственного разрешения, в зависимости от длины ветрового разгона на обширных акваториях.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для адаптации разработанных методов применительно к условиям космического мониторинга обширных акваторий при наличии смешанного волнения в условиях длительного ветрового разгона проводились комплексные эксперименты в акватории Тихого океана вблизи острова Оаху, Гавайи, США (Bondur, 2005; 2011; Keeler et al., 2005). В ходе проведения экспериментов были получены космические изображения высокого пространственного разрешения (0.6–1.0 м) с борта спутников QuickBird (14 сентября 2004 г.) и Ресурс-П (8 июня и 28 июля 2019 г.).

В 2004 г. съемка исследуемого района проводилась с помощью спутника QuickBird на нисходящем витке. При проведении съемки с борта космического аппарата QuickBird ось визирования съемочной системы была отклонена на угол $\sim 14^\circ$ – 15° перпендикулярно направлению полета в сторону востока (Bondur, 2005; Keeler et al., 2005). Аппаратура спутника имеет пространственное разрешение ~ 0.6 м и полосу захвата ~ 16.5 км.

В 2019 году была проведена съемка акватории бухты Мамала с российского космического аппарата Ресурс-П. Аппаратура этого спутника позволила получить панхроматическое изображение акватории на удалении до 36 км от берега, в полосе захвата ~ 17.3 км с пространственным разрешением менее 1 м.

Синхронно с космическими съемками, проводимыми 14 сентября 2004 г. в акватории бухты Мамала, проводились подспутниковые измерения метеорологических и гидрофизических параметров морской среды, в том числе скоростей ветра, частотных и частотно-направленных спектров поверхностного волнения с помощью различной аппаратуры (Bondur, Tsidilina, 2005; Keeler et al., 2004). Подспутниковые исследования в 2004 г. выполнялись с борта 8 малых судов, с береговых станций и морских метеорологических платформ NOAA (Бондур и др., 2007; Bondur, 2011; Bondur, Tsidilina, 2005).

Для измерения возвышений морской поверхности использовались два волномерных буйа Directional Waveriders МК II фирмы Datawell, а для измерения высот и направления волн, а также вертикального движения использовался акселерометр (Keeler et al., 2004).

Перед началом измерений буй опускался в воду с борта судна и дрейфовал до момента подъема на борт. При проведении измерений регистрировались составляющие ускорений буев по координатам x , y , z в течение определенного промежутка времени (обычно 30 мин). При помощи бортового процессора производилась специальная обработка, и данные по радиоканалу передавались на наземную станцию. Координаты местоположения буев определялись с помощью GPS (Бондур и др., 2007; Bondur, Tsidilina, 2005).

Двумерные частотно-направленные спектры поверхностного волнения и одномерные частотные, полученные при проведении комплексных экспериментов с помощью волновых буев, анализировались в диапазоне углов $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ в интервале частот $0.157 \leq \omega \leq 3.644$ с⁻¹. Результаты анализа сопоставления спектров волнения, полученных дистанционными и контактными методами, приведены в работе (Бондур и др., 2020). Для сопоставления с частотными спектрами волнения, измеренными по данным буйковых измере-

ний, двумерные пространственные спектры возвышений морской поверхности, полученные с помощью восстанавливающего оператора $\mathbf{R}$, пересчитывались в частотные спектры с использованием дисперсионного соотношения гравитационных волн по методике, описанной в (Бондур и др., 2016б). На основе такого сопоставления в работе (Бондур и др., 2020) была получена поправка для параметра a_1 в формуле (1) в диапазоне степенного спада частотного спектра. Таким образом, на основе подспутниковых буйковых измерений была проведена валидация восстанавливающего оператора для условий волнообразования в акваториях, где наблюдается смешанное волнение, включающее как ветровые волны при большом разгоне волнения, так и волны зыби. Подобные условия волнообразования соответствовали экспериментам, результаты которых описаны в настоящей работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Волновая ситуация 14 сентября 2004 г. характеризовалась следующим образом. В исследуемой акватории постоянно действовала система волн зыби с $\lambda_{\max 1} \approx 318$ м и система ветровых волн с $\lambda_{\max 2} \approx 35$ м. В волновом поле наблюдаются также короткие волны зыби с длинами $\lambda_{\max 3} \approx 80$ м (Бондур и др., 2007; Bondur, Tsidilina, 2005).

Обобщенный анализ ветрового режима, влияющего на волнообразование во время комплексного эксперимента, проводился как по данным оптической съемки с космического аппарата QuickBird, так и по данным исследований с кораблей, наземных станций, а также по данным спутника QuikSCAT (Bondur, 2011).

На рис. 1 представлена схема ветрового режима в исследуемой акватории. На этом рисунке показаны расположение трассы съемки относительно Гавайского архипелага, а также данные по ветровому режиму, полученные на наземных станциях в г. Гонолулу в день проведения эксперимента.

На наземных станциях за несколько минут до момента съемки со спутника QuickBird скорость и направление ветра составляли следующие величины:

- на станции Kawala – скорость ветра ~ 3.6 м/с, а направление 45° ;
- на станции “Аэропорт” – скорость ветра ~ 2.7 м/с, а направление 50° .

Данные о характеристиках ветрового режима, полученные спутником QuikSCAT до съемки со спутника QuickBird, показывают, что к югу от побережья острова Оаху преобладал ветер со скоростью $W_B \sim 5$ м/с с направлением 80° – 90° . Генеральное направление ветра перед моментом

съемки со спутника QuickBird обозначено белой стрелкой.

Анализ рис. 1 показал, что в зоне съемки со спутника QuickBird выделяются четыре характерные области, связанные с особенностями морского волнения, зарегистрированными на изображении:

- прибрежная зона, которая характеризуется наличием волн прибоя, а также большим количеством кильватерных следов мелких судов;
- ветровая тень, обусловленная влиянием горного массива на острове Оаху;
- зона максимального разгона – участок акватории, расположенный с подветренной стороны, на который не оказывают влияния ветровые тени от соседних островов;
- ветровая тень, обусловленная влиянием о. Молокаи и мелководной банки (Pinguine Bank), расположенной к востоку от зоны съемки со спутника QuickBird.

При анализе характеристик поля ветра, полученных по данным спутника QuickBird, установлено, что скорость приповерхностного ветра увеличивалась в сторону открытого океана и достигла на удалении от берега ~ 30 км значений 8 – 8.5 м/с. При этом происходило изменение его направления от $\sim 90^\circ$ до $\sim 35^\circ$.

На рис. 2, б представлено поле приповерхностного ветра, построенное по результатам пространственного спектрального анализа космического изображения, полученного со спутника QuickBird, с использованием метода, описанного в работе (Бондур, 2004). Как следует из анализа этого рисунка, ближайшие к берегу участки акватории, над которыми измерялась скорость ветра, по данным со спутника QuickBird, были расположены в 3 – 6 км от наземных станций. На этих участках скорость ветра, оцененная по спектрам фрагментов космического изображения, полученного с борта спутника QuickBird, с использованием метода, описанного в (Бондур, 2004), составила 4 м/с, а направление ветра – 85° .

По результатам проведенного анализа в районе проведения эксперимента были выявлены зоны, соответствующие различным условиям волнообразования: прибрежная зона с ограниченным разгоном ветровых волн, зона максимального разгона и ветровая тень.

Для восстановления пространственных спектров взволнованной морской поверхности по оптическим изображениям использовался восстанавливающий оператор в форме (1). Как уже отмечалось, параметры этого оператора были первоначально получены для условий волнообразования в прибрежной зоне с ограниченным ветровым разгоном, в дециметровом и метровом диапазонах длин волн (Бондур, Мурынин 2015), а

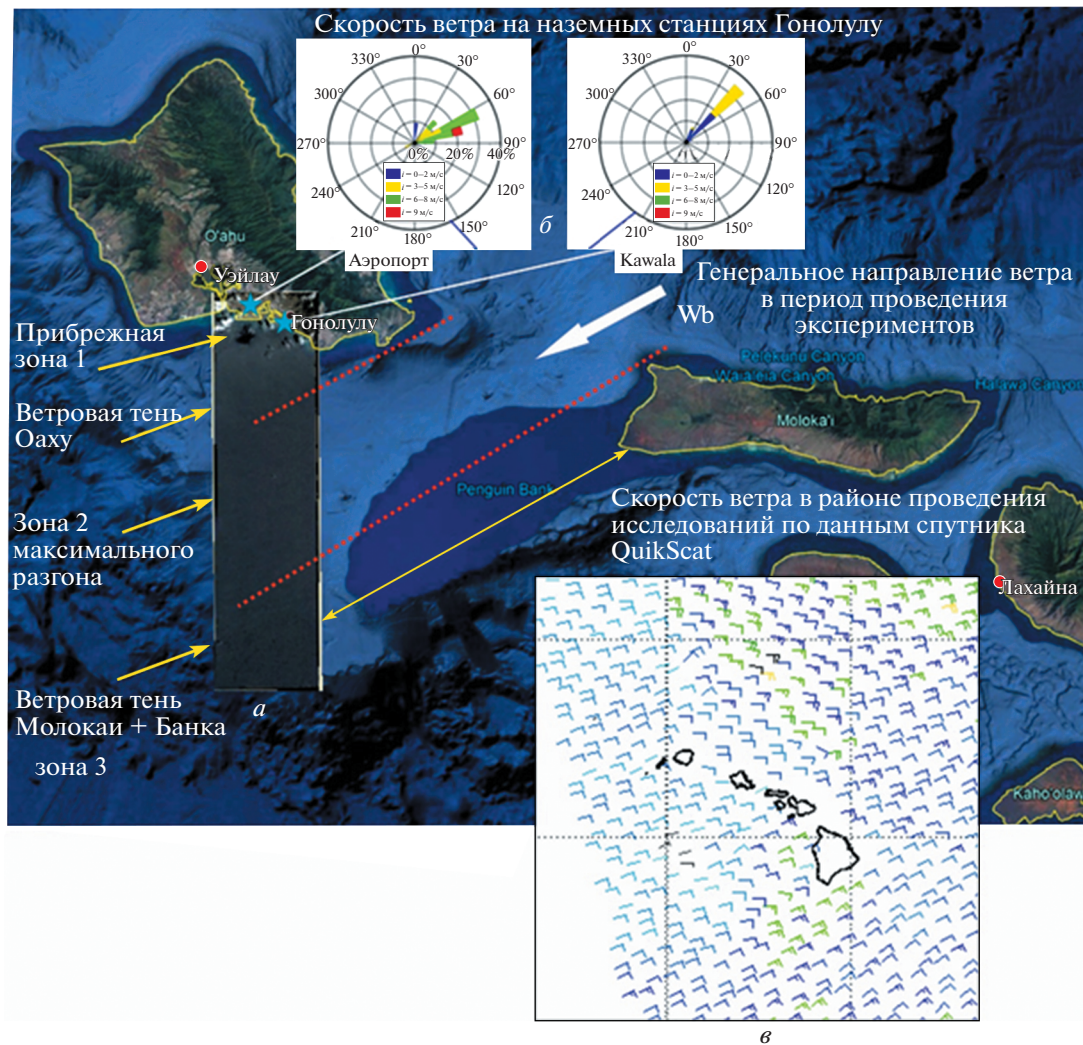


Рис. 1. Анализ ветрового режима в районе комплексного эксперимента в акватории бухты Мамала вблизи острова Оаху, проведенного 14 сентября 2004 г.: *a* – зона съемки спутника QuickBird; *б* – диаграммы скоростей и направлений ветра на станциях “Аэропорт” и “Kawala”; *в* – поле ветра по данным спутника QuikSCAT.

затем адаптированы для адекватного применения в условиях больших ветровых разгонов с использованием результатов сопоставления спектров волнения, измеренных дистанционно, с данными подспутниковых измерений (Бондур и др., 2020). Примеры двумерных спектров уклонов и одномерного разреза восстановленного спектра уклонов в зоне максимального разгона приведены на рис. 2, *в*.

С помощью адаптированного восстанавливающего оператора построены зависимости показателей степенной аппроксимации спектров возвышений морского волнения от расстояния (координаты смещения), измеряемого в направлении ветра, которые приведены на рис. 3, для различных областей исследуемой акватории, представленных на рис. 1: прибрежной зоны, зоны максимального разгона и зоны ветровой тени.

Анализ рис. 3 показал, что изменение степенного показателя пространственного спектра возвышений p_χ от разгона волнения наиболее заметно в прибрежной зоне. С увеличением расстояния от берега величина этого показателя приближается к значению $p_\chi \approx 2.7$. Это значение соответствует значению степенного показателя частотного спектра $p_\omega = 4.4$, если учесть известное соотношение (Бондур и др., 2016б)

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

Таким образом, полученное значение показателя степенной аппроксимации спектров волнения является средним между значением $p_\omega = 5$, соответствующим равновесному спектру Филлипса (Филлипс, 1980), и значением $p_\omega = 4$ в известной аппроксимации Тоба (Тоба, 1973). В зоне максимального разгона показатели степенных

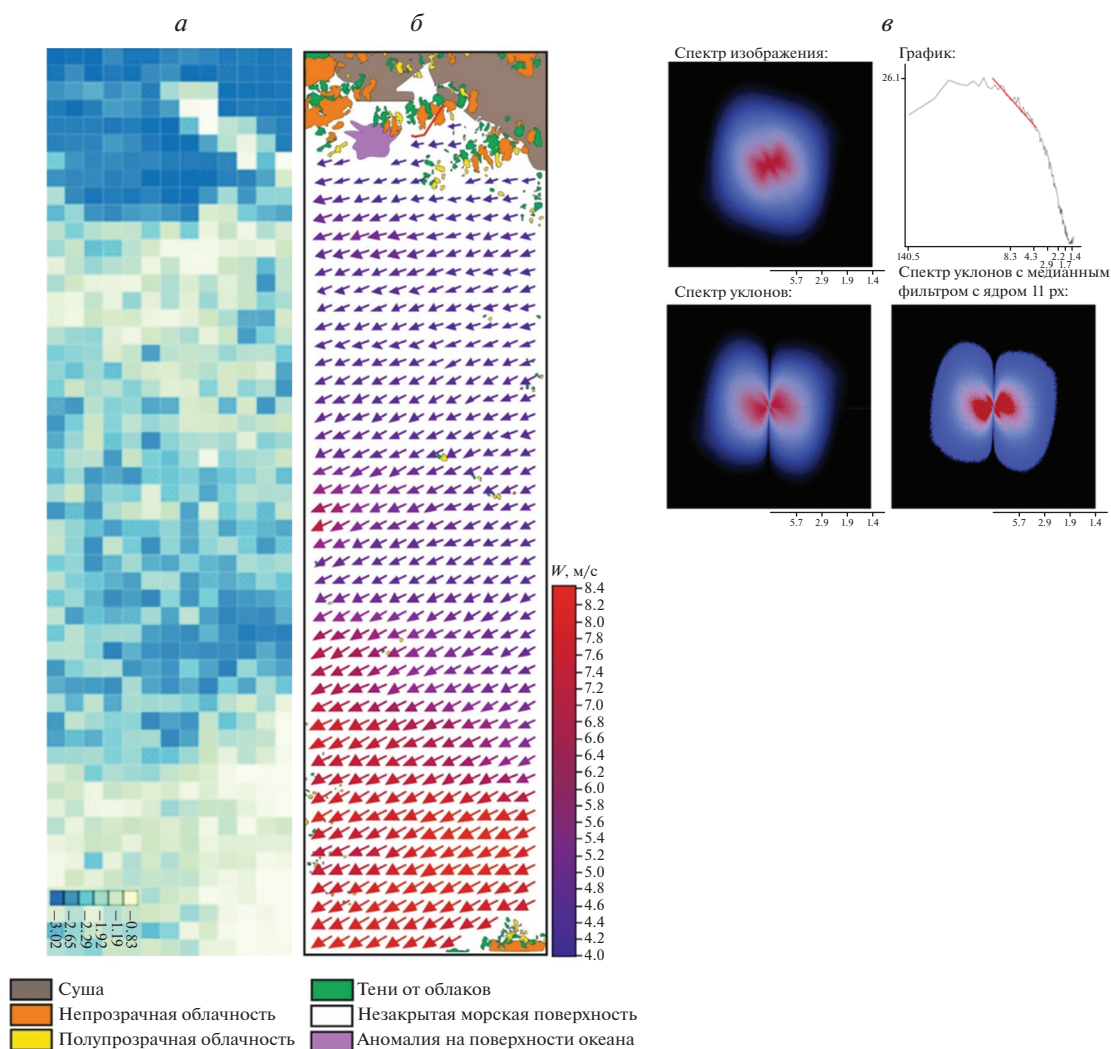


Рис. 2. *a* – распределение параметра степенного показателя (наклона) спектров возвышений, полученных по фрагментам космического изображения; *б* – поле ветра, построенное по результатам пространственного спектрального анализа; *в* – примеры двумерных спектров уклонов и одномерного разреза восстановленного спектра уклонов в зоне максимального разгона.

аппроксимаций пространственных спектров возвышений практически не изменяются и близки к тому же значению $p_\chi \approx 2.7$.

В зоне ветровой тени на большом расстоянии от берега наблюдается плавное изменение показателей степенных аппроксимаций пространственных спектров возвышений между значениями $p_\chi \approx 2.7$, соответствующими максимальному разгону, и значениями $p_\chi \approx 2.5$, которые в точности соответствуют аппроксимации Тоба (Toba, 1973).

Разработанные методы и алгоритмы восстановления пространственных спектров океанского волнения позволили проводить исследование изменчивости характеристик пространственных спектров при наличии различных волновых систем – ветрового волнения и волн зыби.

Приведем примеры использования восстанавливающего оператора для обработки данных космического мониторинга океанских акваторий, полученных аппаратурой ГЕОТОН спутника Ресурс-П. Исследования параметров морского волнения проводились вблизи острова Оаху (Гавайи, США), в районе, где ранее были проведены эксперименты по адаптации восстанавливающих операторов к условиям океанского волнения (Бондур и др., 2020). В процессе выполнения экспериментов 8 июня 2019 г. и 28 июля 2019 г. проводилась космическая съемка и подспутниковые измерения характеристик ветра и наблюдаемых океанских волн.

Схема экспериментов, проведенных 8 июня 2019 г. и 28 июля 2019 г., приведена на рис. 4. Зона съемки, выполненная аппаратурой ГЕОТОН

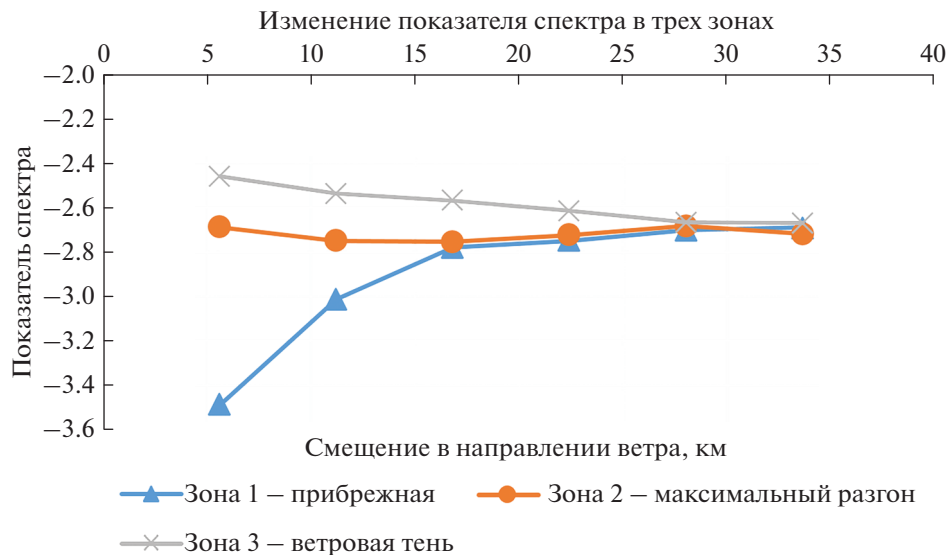


Рис. 3. Примеры зависимостей показателей степенной аппроксимации спектров возвышений морского волнения от координаты смещения в направлении ветра в различных областях исследуемой акватории: 1 – прибрежная зона; 2 – зона максимального разгона; 3 – зона ветровой тени.

спутника Ресурс-П, обозначена на рис. 4, *а*, на рис. 4, *б*, *в* приведены сами космические изображения, полученные 8 июня 2019 г. и 28 июля 2019 г. Примеры восстановленных спектров уклонов морской поверхности показаны на рис. 4, *е*. На этих рисунках обозначено также положение станции подспутниковых измерений (обозначено желтым треугольником).

Подспутниковые измерения включали регистрацию стандартных метеорологических данных в момент космической съемки на станции ООУН1 национальной океанографической службы NOAA (NOAA's National Ocean Service). Станция расположена на побережье бухты Мамала (г. Гонолулу, Гавайи, США) координаты $21^{\circ}18'12''\text{N}$, $157^{\circ}51'52''\text{W}$. Измерения скорости и направления ветра проводились на высоте 7.1 м над базовым уровнем станции, который расположен на высоте 1.6 м над средним уровнем моря.

Графики изменения направлений и скоростей ветра за период с 18:00:00 GMT по 23:54:00 GMT, полученные на станции ООУН1 при подспутниковых экспериментах, приведены на рис. 4, *г*, *д* соответственно.

На рис. 4, *д*, *е* приведены примеры восстановленных двумерных спектров уклонов морских волн и построенных по ним одномерных разрезов. Красной линией показана аппроксимирующая прямая, угол наклона которой позволяет оценить показатель степенной аппроксимации пространственного спектра волнения.

Во время комплексного эксперимента, проведенного 8 июня 2019 г. (время съемки 23:55:55 GMT), ветровая компонента спектра волнения была раз-

вита слабо, так как скорость ветра составляла всего 2–3 м/с. При этом наблюдались довольно значительные волны океанской зыби (длина волны зыби около 50 м). Спутниковая съемка выполнялась при высоте и азимуте Солнца $68^{\circ}02'$ и $80^{\circ}58'$ соответственно. Пространственное разрешение спутникового изображения составило ~ 0.8 м.

Во время эксперимента, проведенного 28 июля 2019 г. (время съемки 23:52:58 GMT), скорость ветра составляла 4–5 м/с. При этом направление ветра было со стороны открытого океана, поэтому имелась возможность длительного разгона волн. В акватории наблюдались также волны океанской зыби (длина волны около 30 м), хотя и менее значительные, чем в первом эксперименте (50 м), проведенном 8 июня 2019 г. Спутниковая съемка выполнялась при высоте и азимуте Солнца $65^{\circ}13'$ и $91^{\circ}05'$ соответственно. Пространственное разрешение спутникового изображения составило 0.717 м.

Результаты измерений, полученных в комплексных экспериментах, проведенных 8 июня 2019 г. и 28 июля 2019 г. сопоставлены на рис. 5. На этом рисунке показаны зависимости показателей степенных аппроксимаций спектров возвышений океанской поверхности, восстановленных по фрагментам космических изображений, от координаты при различных видах волнения, наблюдавшихся в комплексных экспериментах.

В комплексном эксперименте, проведенном 28 июля 2019 г., полученные значения показателей степенных аппроксимаций одномерных спектров возвышений океанской поверхности при удалении от берега стремятся к значению $p_{\chi} \approx 2.7$, кото-

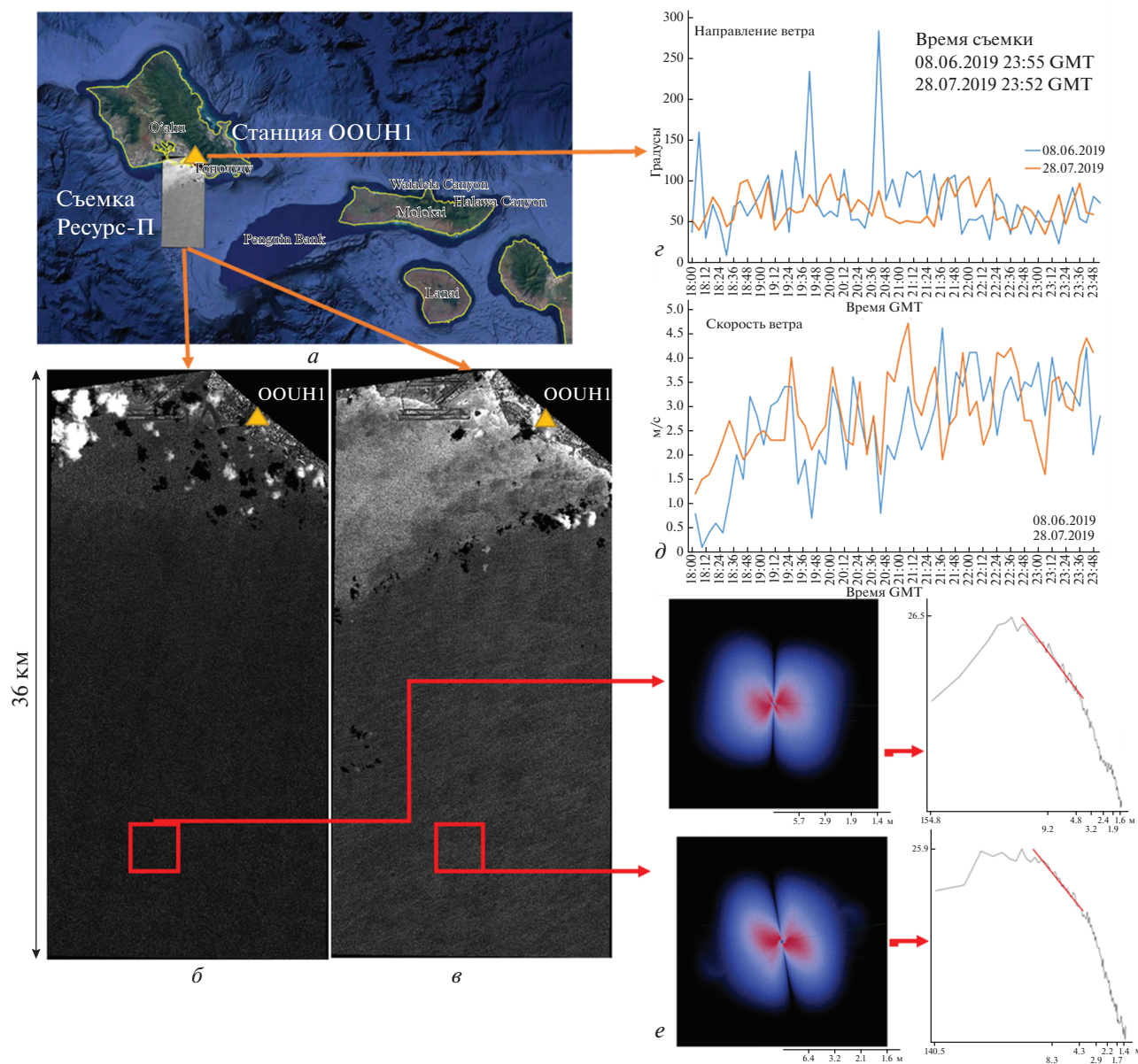


Рис. 4. Схема экспериментов, проведенных в акватории вблизи острова Оаху (Гавайи, США) в 2019 г.: *a* – схема расположения области космической съемки и станции подспутниковых измерений; *б* – космическое изображение, полученное 8 июня 2019 г. со спутника Ресурс-П; *в* – космическое изображение, полученное 28 июля 2019 г. со спутника Ресурс-П; *г* – графики изменения направления ветра на станции ООУН1 в дни проведения экспериментов; *д* – график изменения скорости ветра на станции ООУН1 в дни проведения экспериментов; *е* – примеры двумерных спектров уклонов и их одномерных, восстановленных по космическим изображениям.

рое характерно для развитого ветрового волнения (Полников, 2018).

При этом в комплексном эксперименте, проведенном 8 июня 2019 г., когда в исследуемой акватории преобладали волны зыби, полученные значения показателей степенных аппроксимаций одномерных пространственных спектров возвышений океанского волнения вблизи берега составляли $p_\chi \approx 3.4$, что близко к значению 3.5, ха-

рактерному для волн зыби с учетом пересчета к частотным спектрам волн зыби, имеющим спектр со степенным показателем $p_\omega = 5$ (Давидан и др., 1985). Таким образом, проведенные дистанционные измерения спектров океанского волнения продемонстрировали эффективность метода восстановления спектров пространственно-неоднородного морского волнения и позволили подтвердить имеющиеся представления о характеристиках спектров смешанного волнения и волн зыби.

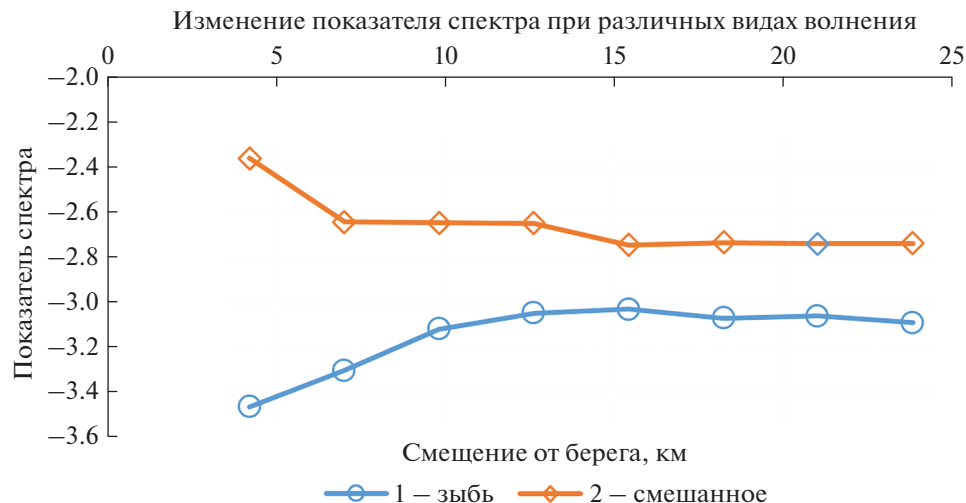


Рис. 5. Примеры зависимостей показателей степенных аппроксимаций спектров возвышений морского волнения от расстояния от берега при различных видах волнения: 1 — зыбь 8.06.2019 г. при слабом ветровом волнении (скорость ветра 2–3 м/с); 2 — смешанное волнение 28.07.2019 г. при порывах ветра со скоростями до 9–10 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение разработанных метода и алгоритма восстановления пространственных спектров волнения для обширных акваторий позволило исследовать изменчивость характеристик пространственных спектров при наличии различных волновых систем — ветрового волнения и волн зыби в океанских акваториях.

На основании анализа их результатов установлено, что зависимость показателей степенных аппроксимаций одномерных пространственных спектров возвышений океанской поверхности от разгона наиболее заметна в прибрежной зоне. С увеличением расстояния от берега величина этих показателей приближается к значению $p_\chi \approx 2.7$, которое является средним между значениями, соответствующими равновесному спектру Филлипса (Филлипс, 1980), и значением, соответствующим известной аппроксимации Тоба (Toba, 1973). В зоне максимального разгона показатели степенных аппроксимаций одномерных пространственных спектров возвышений океанской поверхности практически не изменяются с расстоянием и близки к тем же значениям $p_\chi \approx 2.7$. В зоне ветровой тени на большом расстоянии от берега выявлено плавное изменение степенных показателей между значением $p_\chi \approx 2.7$, соответствующим максимальному разгону, и значением $p_\chi \approx 2.5$, которое в точности соответствует аппроксимации Тоба (Toba, 1973).

Таким образом, исследования, проведенные в тихоокеанской акватории, дали возможность дополнительно изучить некоторые закономерности развития спектров океанского ветрового волнения, а также подтвердить представления о харак-

теристиках спектров смешанного волнения и волн зыби.

Проведенные эксперименты продемонстрировали целесообразность применения разработанного подхода и разработанных алгоритмов для регистрации спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений для исследования обширных океанских акваторий. Результаты работы могут быть использованы для оперативного мониторинга процессов и явлений, происходящих в различных акваториях мирового океана по данным, поступающим с космических носителей.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-55-80021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии. / В кн. Новые идеи в океанологии. М.: Наука. Т1: 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. Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры методом фазового спектра // Исслед. Земли из космоса. 2000а. № 5. С. 28–44.
- Бондур В.Г. Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зон-

- дирования // Исслед. Земли из космоса. 2000б. № 5. С. 16–27.
- 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., Воробьев В.Е., Мурынин А.Б. Восстановление спектров морского волнения по космическим изображениям высокого разрешения при различных условиях волнообразования // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 3. С. 45–58.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420030021>
- 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., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. 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 // Изв. РАН. 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. Т. 46. № 6. С. 805–820.
- 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., 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., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., Долотов Ю.С., Здореннов Р.Э., Петров М.П., Цидилина М.Н. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, 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.
- Воробьев В.Е., Мурынин А.Б., Хачатрян К.С. Высокопроизводительная регистрация пространственных спектров морского волнения при оперативном космическом мониторинге обширных акваторий // Исслед. Земли из космоса, 2020. № 2. С. 56–68.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420020062>
- Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.
- 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.
- Полников В.Г. Роль механизмов эволюции в формировании равновесного спектра ветровых волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 462–473.
- Трубкин И.П. Ветровое волнение. Взаимодействие и расчет вероятностных характеристик. М.: Научный мир, 2007. 264 с.
- Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 319 с.
- Bondur V. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
- Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modelling 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., 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.

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

Keeler R., Bondur V., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2005.

V. 32. L12610. P. 1–5.

<https://doi.org/10.1029/2005GL022390>

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

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>

Retrieving Spectra of Spatially Inhomogeneous Sea Waves during Satellite Monitoring of Vast Water Areas

V. E. Vorobyev¹ and A. B. Murynin^{1,2}

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

²*Federal Research Center “Computer Science and Control” of the RAS, Moscow, Russia*

Here we analyze the capabilities of using a method to register spectra of spatially inhomogeneous sea waves using high spatial resolution imagery during the monitoring of extensive water areas. The results of comprehensive experiments to study the developed method for the prompt retrieval of sea wave spatial spectra from satellite imagery are presented that can be used for water areas with mixed waves including wind waves under the conditions of intensive fetch and swell. Here are analyzed the factors of power approximation of spatially inhomogeneous waves retrieved using high spatial resolution satellite imagery depending on the fetch length within extensive water areas. It is found out that the values of such factors for sea wave elevation spatial spectra change most intensively in the coastal zone. With increasing distance from the shore, these factors approach the value of $p_\chi \approx 2.7$. At a large distance from the shore, a gradual decrease in the power-law exponent to $p_\chi \approx 2.5$ was revealed in the wind shadow zone, which corresponded to the known analytical approximations.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, spatially-inhomogeneous sea waves, wave spectra, retrieving operators, image processing

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 dstantsionnogo zondirovaniya [The Methods of the Emission Model Field Which Be Formed on Enter of Airspace Remote Sensing System] // *Issled. Zemli is Kosmosa*. 2000b. № 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] // *Issled. Zemli is Kosmosa*. 2000a. № 5. P. 28–44 (In Russian).

Bondur V.G. Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 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-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>

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 // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2016. 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 // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2016. V. 52. № 9. P. 888–903. DOI: 10.1134/S0001433816090097

Bondur V.G., Filatov N.N., Grebenyuk Yu.V., Dolotov Yu.S., Zdorovenkov 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., Grebenuk Y.V. Dstantsionnaya indikatsiya antropogennykh vozdeystviy na morskuyu sredu, vyzvannykh zaglublennymi stokami: modelirovaniye, eksperimenty [Remote indication of anthropogenic influence on marine environment caused by depth wastewater plume: Modeling, experiments] // *Issled. Zemli iz Kosmosa*. 2001. № 6. P. 49–67 (In Russian).

- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D.* The spectral characteristics and kinematics of short-period internal waves on the Hawaiian shelf // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 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*. 2008. V. 48. № 5. P. 611–621. DOI: 10.1134/S0001437008050019
- Bondur V.G., Murynin A.B.* Methods for retrieval of sea wave spectra from aerospace image spectra // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 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 [Restoration 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. C. 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 // *Dokl. Earth Sciences*. 2013. V. 450. Part 1. P. 526–530. DOI: 10.1134/S1028334X13050012
- Bondur V.G., Sharkov E.A.* Statisticheskiye kharakteristiki pennyykh obrazovaniy na vzvolnovannoy morskoy poverkhnosti [Statistical characteristics of foam formations on a disturbed sea-surface] // *Okeanologiya*. 1982. V. 22. № 3. P. 372–379 (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 Y.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 // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2013. V. 49. № 9. P. 886–896. DOI: 10.1134/S000143381309003X
- Bondur V.G., Vorobyev V.E., Murynin A.B.* Vosstanovlenie spektrov morskogo volneniya po kosmicheskim izobrazheniyam vysokogo razresheniya pri razlichnykh usloviyakh volnobrazovaniya [Retrieving Sea Wave Spectra Using High Resolution Satellite Imagery under Various Conditions of Wave Generation] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2020. № 3. P. 45–58 (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420030021
- Bondur V.G., Zhurbas V.M., Grebenyuk Yu.V.* Mathematical Modeling of Turbulent Jets of Deep-Water Sewage Discharge into Coastal Basins // *Oceanology*. 2006. 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 sbro-
- sa 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] // *Issled. Zemli iz Kosmosa*. 2005. № 4. P. 54–61 (In Russian).
- Davidan I.N., Lopatukhin L.I., Rozhkov V.A.* Vetrovoe volnenie v Mirovom Okeane [Wind waves in the World Ocean] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 256 p. (In Russian).
- Keeler R., Bondur V., Gibson C.* Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L12610. P. 1–5. DOI:10.1029/2005GL022390
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004. P. 53–58.
- Murynin A.B.* Parametrizatsiya filtrov, vosstanavlivayushchikh prostranstvennye spektry uklonov morskoy poverkhnosti po opticheskim izobrazheniyam [Parametrization of filters restoring spatial spectra of slopes of sea surface using optical images] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 1991. № 5. P. 31–38 (In Russian).
- Murynin A.B.* Vosstanovlenie prostranstvennykh spektrov morskoy poverkhnosti po opticheskim izobrazheniyam v nelineynoy modeli polya yarkosti [Retrieving spatial sea surface spectra using optical imagery in brightness field nonlinear model] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 1990. № 6. P. 60–70 (In Russian).
- Phillips O.M.* Dinamika verkhnego sloya okeana [The dynamics of the upper ocean]: Transl. from Engl. Moscow: Mir, 1980. 319 p. (In Russian).
- Polnikov V.G.* The role of evolution mechanisms in the formation of a wind-wave equilibrium spectrum // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2018. V. 54. № 4. P. 394–403.
- Toba J.* Local balance in the air–sea boundary process // *Oceanogr. Soc. Japan*. 1973. V. 29. P. 209–225.
- Trubkin I.P.* Vetrovoe volnenie. Vzaimodejstvie i raschet veroyatnostnykh kharakteristik [Wind waves. Interaction and calculation of probability characteristics]. Moscow: Nauchny mir, 2007. 264 p. (In Russian).
- Vorobev V.E., Murynin A.B., Khachatryan K.S.* Vysokoproizvoditelnaya registratsiya prostranstvennykh spektrov morskogo volneniya pri operativnom kosmicheskom monitoringe obshirnykh akvatorij [High performance registration of sea wave spatial spectra during online satellite monitoring of extensive water areas] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2020. № 2. P. 56–68 (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420020062.
- 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>