
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ
ПО КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ**

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

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

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

*e-mail: vgbondur@aerocosmos.info

**e-mail: office@aerocosmos.info

***e-mail: amurynin@bk.ru

Поступила в редакцию 08.04.2020 г.

Развит метод восстановления спектров морского волнения по космическим изображениям высокого пространственного разрешения применительно к различным условиям волнообразования, основанный на использовании восстанавливающих операторов, формируемых в виде пространственно-частотных фильтров, параметры которых адаптируются к реальным условиям. Адекватность метода апробирована с использованием данных, полученных в комплексных экспериментах, проведенных в прибрежной акватории Черного моря и в открытых акваториях Тихого океана вблизи Гавайских островов, путем сопоставления спектров волнения в диапазоне частот 0.29–0.59 Гц (длины длин волн 4.5–20 м), восстановленных по космическим изображениям, полученным со спутников QuickBird и Ресурс-П, а также спектров, измеренных с помощью волновых буйев. На основании результатов проведенных исследований уточнено значение параметра восстанавливающего пространственно-частотного фильтра для участка степенного спада частотного спектра волнения, составившее величину –0.05 применительно к сложным условиям волнообразования (длительный разгон, система волн, содержащая ветровые волны и различные волны зыби), которое отличается от полученного ранее значения –0.43 в условиях ограниченного разгона.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, спектры волнения, взволнованная морская поверхность, восстанавливающий оператор, космические изображения, волновой буй

DOI: 10.31857/S0205961420030021

ВВЕДЕНИЕ

Информация о морском волнении важна для исследования многих физических процессов и явлений, происходящих на границе раздела океан–атмосфера (Монин, Красицкий, 1985; Давидан и др., 1985; Филлипс, 1980; Бондур, 2004), а также для прогнозирования воздействия интенсивных поверхностных волн на морские объекты и береговые сооружения (Ветер, волны..., 1986; Крылов и др., 1976; Режим, диагноз..., 2013). Ветровое волнение оказывает значительное влияние на безопасность различных объектов (суда, портовые и гидротехнические сооружения (Ветер, волны..., 1986; Крылов и др., 1976), объекты нефтегазового комплекса (Бондур, 2010) и т.д.), а также на эффективность морской хозяйственной деятельности: судоходство; рыболовство и рыбное хозяйство; поиск, разведка и добыча полезных ископаемых в зонах континентального шельфа и за их пределами; строительство морских судов и гидро-

технических сооружений; мониторинг и ликвидаций загрязнений морских акваторий; защита берегов от волновой эрозии; морской туризм; рекреационная деятельность и др. (Режим, диагноз..., 2013; Ветер, волны..., 1986; Крылов и др., 1976; Халфин, 1990; Бондур, 2010). Под воздействием морского волнения может происходить также абразия берегов, которая представляет реальную угрозу для различных объектов, расположенных на побережье (Лукьянова, Соловьева 2009).

Исследование ветрового волнения в акваториях морей и океанов позволяет производить расчет и прогноз разнообразных характеристик поверхностных волн как первого уровня информативности (высота, период, длина, генеральное направление распространения волн и др.), так и более высокого уровня (одномерные частотный и пространственный и двумерный спектры, угловое распределение энергии волн и др.), что значительно расширяет спектр потребителей этой

актуальной информации (Давидан и др., 1985; Трубкин, 2007; Режим, диагност..., 2013).

Физические особенности процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, а следовательно, и характер спектров морского волнения, зависят от скорости и продолжительности действия приповерхностного ветра, от длины разгона и других условий (Давидан и др., 1985; Филлипс, 1980; Трубкин, 2007). Поэтому важно исследование спектров волнения в широком диапазоне длин волн на обширных акваториях при различных условиях волнообразования. Для проведения таких исследований перспективно использование аэрокосмических методов дистанционного зондирования (Бондур, 2004, 2010; Bondur, 2005; 2011; Collard, et al., 2009). Такие методы могут с успехом применяться для анализа спектров ветрового волнения на обширных акваториях (Бондур, 2004; Бондур и др. 2016а, б), а также для исследования различных процессов и явлений на взволнованной морской поверхности, например, пенной активности (Бондур, Шарков, 1982), антропогенных воздействий на водную среду (Бондур, 2004; Бондур и др., 2012; Bondur, 2005, 2011) и многих других (Бондур, 2004).

Для получения информации о пространственных спектрах высот и уклонов морского волнения в области высоких пространственных частот могут использоваться оптические изображения сверхвысокого пространственного разрешения (от единиц до десятков см), полученные с борта низколетящих летательных аппаратов (вертолеты, самолеты) и морских платформ, а также методы восстановления этих спектров по спектрам изображений (Бондур, 2004; Бондур, Мурынин, 1991, 2015).

С развитием современных космических средств стало возможным получение спутниковых оптических изображений высокого и очень высокого пространственного разрешения (от 1 м до десятков см), что значительно повысило их возможности для исследования спектров поверхностного волнения на обширных акваториях в широком диапазоне пространственных частот (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др., 2016а, б).

Для восстановления спектров развитого морского волнения по спектрам оптических аэрокосмических изображений используются методы, учитывающие нелинейный характер формирования поля яркости морской поверхности (Бондур, 2000, 2004; Бондур, Мурынин, 1991, 2015; Мурынин, 1990).

В настоящей работе развивается метод восстановления спектров морского волнения по космическим изображениям высокого пространственного разрешения применительно к различным условиям волнообразования, в том числе для раз-

вивающегося волнения, при наличии нескольких систем волн в присутствии волн зыби.

БАЗОВЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Для оценки спектров поверхностного волнения по оптическим аэрокосмическим изображениям используются восстанавливающие операторы, позволяющие получать спектры возвышений и уклонов морских волн из пространственных спектров полей яркости, регистрируемых в процессе дистанционного зондирования (Бондур, 2004; Бондур, Мурынин, 1991, 2015; Бондур и др., 2016а, б; Yurovskaya et al., 2013). Эти операторы строятся с учетом характеристик аппаратуры дистанционного зондирования и условий формирования аэрокосмических изображений, а также нелинейных физических механизмов формирования полей оптических сигналов, регистрируемых аппаратурой дистанционного зондирования (Бондур, 2000, 2004; Бондур, Мурынин, 1991, 2015; Мурынин, 1990).

Поскольку связь полей возвышений и уклонов морской поверхности, а также их спектров с полями яркости, регистрируемыми аэрокосмической аппаратурой, имеет вид, неблагоприятный для аналитического решения, то применяется прямое численное моделирование оптических изображений взволнованной морской поверхности с использованием метода фазового спектра (Бондур, 2000) и рассчитываются возникающие искажения спектров волнения (Бондур, Мурынин, 2015). Для получения восстанавливающих операторов численным методом синтезируются двумерные случайные поля уклонов морской поверхности с заданными аппроксимациями пространственных спектров, а затем для конкретных условий освещения и условий проведения съемки рассчитываются поля яркости с учетом характеристик средств, формирующих аэрокосмические изображения (Бондур, 2000). Такие операторы определяются путем сопоставления спектров модельных оптических изображений со спектрами уклонов морской поверхности, синтезированной для реальных условий (Бондур, 2004; Бондур, Мурынин, 1991, 2015).

При численном моделировании оптических изображений морской поверхности должны задаваться параметры, характеризующие условия их формирования, которые влияют на вид восстанавливающего оператора $R(k)$ (Бондур, 2000, 2004; Бондур, Мурынин, 2015). При обработке реальных аэрокосмических изображений морской поверхности эти параметры берутся непосредственно из условий проведения съемки (Бондур, 2000).

Для сокращения расходов вычислительных ресурсов в процессе численного моделирования используется подход к определению восстанавливающего оператора $\mathbf{R}(\mathbf{k})$, который предполагает выполнение предварительного численного моделирования изображений морской поверхности при различных комбинациях параметров условий, объединенных в многомерный вектор $\mathbf{W}_R$ (Бондур, 2000). При каждом конкретном наборе условий $\mathbf{W}_R$ восстанавливающий оператор $\mathbf{R}(\mathbf{k})$ аппроксимируется аналитической формулой

$$\mathbf{R}(\mathbf{k}) = \mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a}), \quad (1)$$

связанной с некоторым набором параметров, который обозначим многомерным вектором параметров аппроксимации $\mathbf{a}$, зависящим от условий формирования полей яркости морской поверхности.

В результате предварительного моделирования строится зависимость $\mathbf{a}(\mathbf{W}_R)$, а затем в процессе обработки экспериментальных данных для каждого изображения (или его фрагмента) определяется вектор условий $\mathbf{W}_R$, рассчитывается $\mathbf{a}(\mathbf{W}_R)$ и формируется восстанавливающий оператор $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$ в виде аналитической функции. Поскольку число параметров, участвующих в формировании изображений морской поверхности, довольно велико, то актуальной становится задача сокращения размерности вектора $\mathbf{W}_R$. Такая задача решается на этапе предварительного моделирования путем анализа влияния изменения j -й компоненты этого вектора $(\mathbf{W}_R)_j$ на характеристики восстанавливающего оператора $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$ (Бондур, Мурынин, 2015).

Аналитическую аппроксимацию восстанавливающего оператора $\mathbf{R}(\mathbf{k}, \mathbf{a})$ в полярных координатах (k, φ) можно представить в виде функции (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др., 2016а; Мурынин, 1991)

$$\mathbf{R}(\mathbf{k}) = a_0(\exp(a_4 k^{a_5})) \times ((\cos(\varphi - \varphi_c))^{a_3} k^{a_1 + a_2 \cos(\varphi - \varphi_c)}), \quad (2)$$

где $k = |\mathbf{k}|$ — модуль волнового вектора $\mathbf{k}$; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 компоненты вектора $\mathbf{a}$; a_4, a_5 — параметры, описывающие восстанавливающий фильтр в области низких пространственных частот (Бондур и др., 2016а).

Компоненты a_1, a_2, a_3 характеризуют область степенного спада спектральной плотности морского волнения и позволяют учитывать искажения показателей степенных аппроксимаций спектров уклонов морского волнения для различ-

ных направлений распространения волн (Бондур, Мурынин, 2015; Мурынин, 1991), при этом:

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

a_2 — вносит поправку в значение 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 (2) позволяет учитывать искажения операторов, восстанавливающих спектры взволнованной морской поверхности по спектрам изображений для различных направлений распространения волн.

Спектры морского волнения в интервале равновесия имеют степенной закон спада, который сохраняется в широком диапазоне пространственных частот (Филлипс, 1980; Полников, 2018; Тоба, 1973). Поэтому при обработке аэрокосмических изображений принципиальное значение имеет знание параметра a_1 . Этот параметр позволяет восстановить точное значение показателя степенного спада спектров волнения вплоть до верхних границ диапазона пространственных частот, регистрируемых на космических изображениях.

Принимая во внимание сохранение степенного закона спада спектра, можно экстраполировать спектры в области более высоких частот в виде степенной функции с тем же показателем a_1 . Таким образом, появляется возможность получать пространственные спектры морских волн за пределами диапазона пространственных частот, доступных на космических изображениях. Фактически это означает, что применение восстанавливающего оператора с достоверным значением параметра a_1 эквивалентно повышению пространственного разрешения космического изображения морской поверхности (Бондур, 2000).

Адекватность представления восстанавливающих операторов в виде (2) экспериментально проверена в широком диапазоне пространственных частот с применением контактных данных, полученных с помощью решетки струнных волнографов, а также путем стереофотосъемки со стационарной океанографической платформы в прибрежной акватории Черного моря вблизи поселка Кацивели (Крым) (Бондур и др., 2016б). При этом оптимальные параметры восстанавливающего оператора определялись итерационным методом путем сопоставления спектров аэрокосмических изображений со спектрами морского волнения, измеренными с высокой точностью

контактными методами в контролируемых условиях (Бондур и др., 2016б).

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ДЛЯ ШИРОКОГО НАБОРА УСЛОВИЙ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ

Применение рассматриваемого метода к различным условиям, в частности для продолжительных ветровых разгонов, а также для смешанного волнения в присутствии волн зыби, требует адаптации операторов, восстанавливающих спектры уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений, к различным условиям волнообразования. Для этого необходимо формирование модернизированных восстанавливающих операторов $\mathbf{R}(\mathbf{k})$. Эти восстанавливающие операторы должны зависеть от ряда условий получения аэрокосмических изображений, а также и от характеристик самих спектров морского волнения, которые подлежат определению. Таким образом, требуется разработка специальных подходов к адаптации методов построения восстанавливающих операторов с последовательным приближением условий, задаваемых при численном моделировании изображений морской поверхности (Бондур, 2000), к реальным условиям их получения (Бондур, Мурынин, 2015).

Для решения этой задачи представим вектор параметров $\mathbf{W}_R$ в виде

$$\mathbf{W}_R = \{\mathbf{W}_{RG}, \mathbf{W}_{R0}\}, \quad (3)$$

где $\mathbf{W}_{RG}$ — вектор совокупности параметров модельного спектра волнения $G(\mathbf{k})$, задаваемого при построении восстанавливающего оператора $\mathbf{R}(\mathbf{k})$ численным методом; $\mathbf{W}_{R0}$ — остальные компоненты вектора условий $\mathbf{W}_R$.

Восстановление спектров морского волнения по спектрам космических изображений будем проводить путем последовательных итераций. На первой итерации параметры модельного спектра $\mathbf{W}_{RG}$ задаются равными некоторым усредненным значениям $\mathbf{W}_{RG(1)}$, соответствующим, например, аппроксимациям равновесного спектра возвышений морской поверхности (Филлипс, 1980). По этим параметрам получаются первые оценки восстанавливающих операторов $\mathbf{R}_{(1)}$ и определяются пространственные спектры морского волнения в первом приближении $\Psi_{(1)}(\mathbf{k})$. Эти оценки используются для уточнения параметров модельных спектров и определения вектора $\mathbf{W}_{RG(2)}$. На второй итерации восстановления рассчитываются операторы $\mathbf{R}_{(2)}$ и восстанавливаются спектры волнения во втором приближении $\Psi_{(2)}(\mathbf{k})$.

Таким образом, итерационный процесс может быть продолжен и дальше, на третью итерацию и т.д. В ходе проведенных численных экспериментов установлено, что для устранения нелинейных искажений с практически приемлемой точностью бывает достаточно двух итераций восстановления (Бондур и др., 2016б). При этом в процессе уточнения параметров модельных спектров $\mathbf{W}_{RG(2)}$, используемых для оценки спектров возвышений морской поверхности, полученных на первой итерации $\Psi_{(1)}(\mathbf{k})$, важен выбор областей волновых чисел, в пределах которых нелинейные искажения спектров морского волнения минимальны.

Как правило, спектры возвышений морской поверхности в области степенного спада близки к изотропной форме (Давидан и др., 1985; Филлипс, 1980; Трубкин, 2007). Это позволяет использовать для оценки параметров спектров возвышений одномерные разрезы

$$F(k, \varphi) = \Psi_{(1)}(k \cos \varphi, k \sin \varphi). \quad (4)$$

При этом волновой азимут φ должен соответствовать направлению наименьших нелинейных искажений спектров волнения. Будем учитывать, что эти искажения минимальны при $\varphi = \varphi_c$, где φ_c — параметр, определяемый условиями освещения анализируемых фрагментов космических изображений. Поэтому для определения параметров модельных спектров возвышений морской поверхности целесообразно использовать разрезы (4) при $\varphi \approx \varphi_c$. В качестве компонент вектора $\mathbf{W}_{RG}$ можно использовать, например, параметры степенных аппроксимаций разрезов спектров возвышений морского волнения.

Таким образом, восстановление спектров возвышений морской поверхности с адаптацией восстанавливающего оператора к различным условиям волнообразования включает следующие операции:

- задание первой итерации параметров модельного спектра $\mathbf{W}_{RG(1)}$;
- построение первой итерации восстанавливающего оператора $\mathbf{R}_{(1)}$, соответствующей первой итерации параметров модельного спектра $\mathbf{W}_{RG(1)}$;
- оценка спектров возвышений морской поверхности в первом приближении $\Psi_{(1)}$ (1-я итерация);
- уточнение параметров спектров и задание второй итерации параметров модельного спектра $\mathbf{W}_{RG(2)}$;
- построение второй итерации восстанавливающего оператора $\mathbf{R}_{(2)}$ с использованием второй итерации параметров модельного спектра $\mathbf{W}_{RG(2)}$;

- восстановление спектров возвышений морской поверхности во втором приближении $\Psi_{(2)}(\mathbf{k})$ (2-я итерация).

Этот подход применялся в настоящей работе. При этом в качестве первой итерации использовались восстанавливающие операторы, параметризованные с привлечением данных подспутниковых измерений. В качестве таких данных использовались результаты измерений, которые проводились с океанографической платформы в прибрежной акватории Черного моря в районе поселка Кацивели (Крымское побережье) при ограниченном разгоне (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др. 2016б).

Для адаптации разработанных методов к более широкому набору условий волнообразования, параметры восстанавливающих операторов, сформированные на основании этих измерений, уточнялись по данным, полученным в ходе комплексных экспериментов, проведенных при различных условиях. В настоящей работе в качестве таких данных использовались космические изображения высокого пространственного разрешения, снятые с борта спутников QuickBird и Ресурс-П, а также результаты подспутниковых измерений, в том числе с помощью волновых буев, которые проводились в открытых акваториях Тихого океана у острова Оаху (Гавайи). Результаты этих экспериментов приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Акватории, выбранные для адаптации операторов, восстанавливающих спектры поверхностного волнения по спектрам космических изображений при более сложных условиях волнообразования, показаны на рис. 1. Как уже указывалось выше, в прибрежной акватории в районе поселка Кацивели (Крымское побережье), показанной на рис. 1, а, в условиях ограниченного разгона морских волн был получен восстанавливающий оператор (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др., 2016б), параметры которого использовались в качестве первой итерации. Уточнение параметров восстанавливающего оператора применительно к более сложным условиям волнообразования производилось с использованием результатов экспериментов, проведенных в тихоокеанских акваториях в районе Гавайских островов.

На врезке рис. 1, а показана акватория бухты Мамала у острова Оаху (Гавайи), где в течение ряда лет проводились комплексные наземно-космические эксперименты по исследованию антропогенных воздействий на прибрежные акватории (Бондур и др., 2007, 2008, 2009, 2013; Bondur, 2005; 2011; Bondur, Tsidilina, 2005). На рис. 1, б показана акватория Тихого океана у Гавайских островов, с

указанием расположения буев NOAA (желтые ромбы) и внешний вид буев 51003 и 51002, в которой в октябре и ноябре 2019 г. проводилась оптическая съемка с борта космического аппарата Ресурс-П.

В ходе комплексных экспериментов, проведенных в акватории бухты Мамала, была получена серия космических изображений высокого пространственного разрешения (Bondur, 2005, 2011) и широкий набор данных подспутниковых измерений (Бондур и др., 2007, 2008, 2009, 2013; Bondur, 2005; Bondur, Tsidilina, 2005; Keeler et al., 2004;). В настоящей работе использовались результаты космической съемки исследуемого района, которая была выполнена 14 сентября 2003 г. с борта спутника QuickBird на нисходящем витке. При проведении космической съемки ось визирования съемочной системы была отклонена на угол $\sim 14^\circ - 15^\circ$ перпендикулярно направлению полета в сторону востока. Аппаратура спутника имела пространственное разрешение ~ 0.6 м и полосу захвата ~ 16.5 км (Bondur, 2005; 2011).

Синхронно с космическими съемками в акватории бухты Мамала проводились подспутниковые измерения гидрофизических параметров морской среды и метеорологических характеристик, в том числе: скоростей приповерхностного ветра; полей течений (Бондур и др., 2008, 2009, 2013); частотных и частотно-направленных спектров поверхностного волнения и других характеристик (Бондур и др., 2007; Bondur, 2005; Keeler et al., 2004). Подспутниковые измерения выполнялись с борта 8 малых судов, оборудованных погружаемыми и буксируемыми зондами, с заякоренных станций для измерений вертикальных профилей температуры и характеристик полей скоростей течений, а также с удаленных морских метеорологических платформ NOAA и береговых станций (Бондур и др., 2007; Bondur, 2005).

Для измерения частотных спектров возвышений морской поверхности использовались два дрейфующих волновых буя Directional Waveriders МК II фирмы Datawell. Эти буи имели сферическую форму, диаметр 0.9 м. Для измерения высот и направлений волн, а также вертикальных движений использовались акселерометры (Бондур и др., 2007; Keeler et al., 2004). Перед началом измерений спектров волнения буи опускались в воду с борта судна и дрейфовали на расстоянии около 5 км от берега до момента подъема на борт (Bondur, 2005). В процессе проведения измерений регистрировались составляющие ускорений буев по координатам x, y, z в течение 30-минутных промежутков времени. При помощи бортовых процессоров производилась специальная обработка, результаты которой по радиоканалу передавались на наземную станцию. Координаты местоположения буев определялись с помощью GPS.

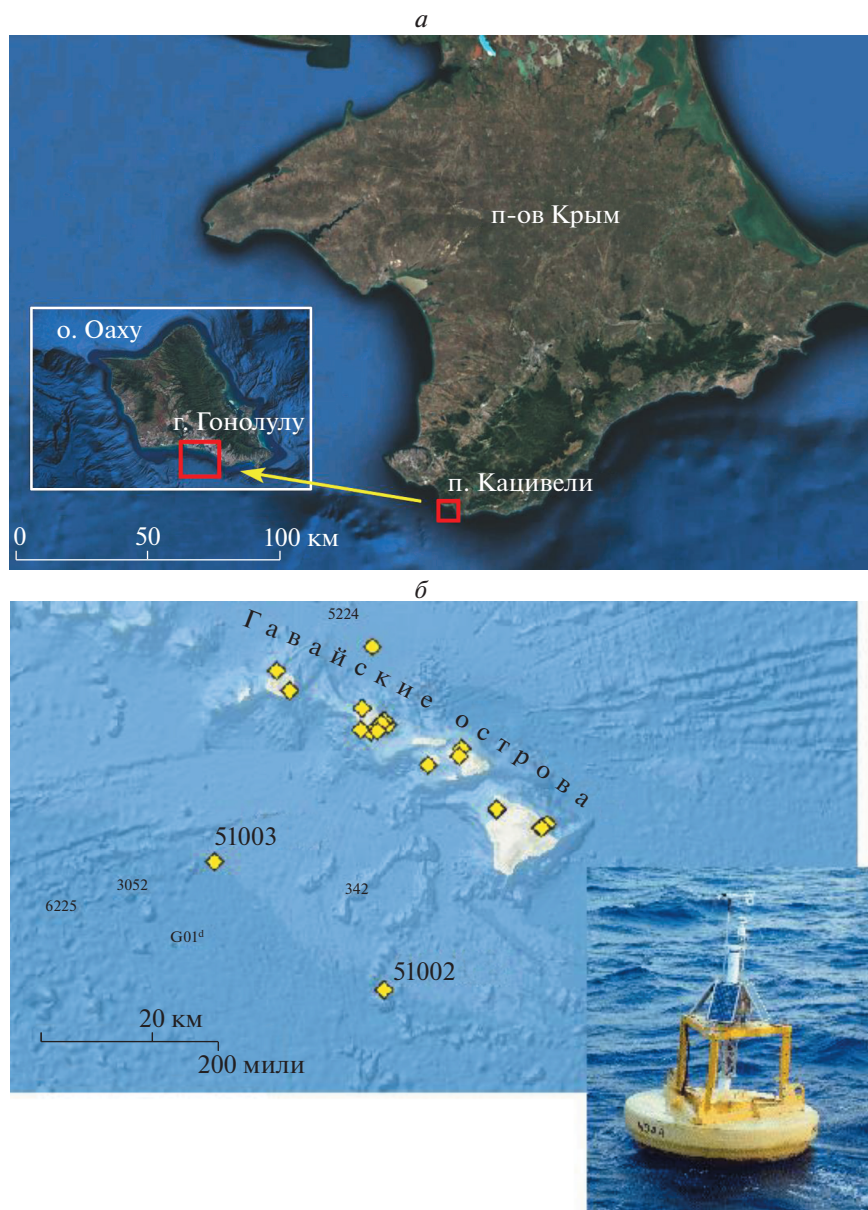


Рис. 1. Акватории для экспериментальных исследований:

а — черноморская акватория вблизи поселка Качивели, в которой получена первая итерация параметров восстанавливающего оператора и тихоокеанская акватория вблизи г. Гонолулу (остров Оаху, Гавайи), где получена вторая итерация параметров этого оператора (районы исследований выделены красными прямоугольниками); *б* — акватория у Гавайских островов, с указанием расположения буев NOAA (желтые ромбы) и внешний вид буев 51003 и 51002, вблизи которых получены данные для уточнения параметров восстанавливающего оператора.

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 $0.157 \leq \omega \leq 3.644 \text{ с}^{-1}$ (Бондур и др., 2007).

Во время проведения комплексного эксперимента в исследуемой акватории бухты Мамала присутствовала сложная система волн. Она включала волны зыби с максимальными длинами $\lambda_{\max 1} \approx 318 \text{ м}$

и систему ветровых волн с максимальными длинами $\lambda_{\max 2} \approx 35 \text{ м}$. В волновом поле наблюдались также короткие волны зыби с максимальными длинами $\lambda_{\max 3} \approx 80 \text{ м}$. Обобщенный анализ ветрового режима, влияющего на процессы волнообразования во время проведения комплексного эксперимента, осуществлялся по данным оптической съемки с борта космического аппарата QuickBird с использованием специальной методики (Бондур, 2004), по результатам измерений с

кораблей, наземных станций, а также по данным спутника QuikSCAT (Chelton et al., 2006).

Анализ характеристик поля ветра, показал, что в момент съемки, проведенной со спутника QuickBird, к югу от побережья острова Оаху преобладал ветер со скоростью $W_B \sim 5$ м/с (направление ветра $80^\circ\text{--}90^\circ$), при этом его скорость увеличивалась в сторону открытого океана и достигла на удалении от берега ~ 30 км значений $8\text{--}8.5$ м/с. При этом происходило изменение его направления от 90° до $\sim 35^\circ$.

При восстановлении пространственных спектров морского волнения по оптическим космическим изображениям использовался восстанавливающий оператор $\mathbf{R}$ в форме (2). Первая итерация параметров этого оператора была получена в дециметровом и метровом диапазонах длин волн применительно к условиям волнообразования с ограниченным разгоном, характерным для прибрежной акватории Черного моря (см. рис. 1, а (Бондур и др., 2016б)). Для адекватного применения этого оператора в условиях проведения конкретного эксперимента в акватории бухты Мамала выполнялось уточнение параметров восстанавливающего оператора, полученных ранее в прибрежной акватории Черного моря, путем сопоставления спектров волнения, измеренных дистанционно, с данными, полученными с помощью волновых буев.

Для проведения такого сопоставления двумерный пространственный спектр возвышений морской поверхности, полученный по космическому изображению, снятому с борта спутника QuickBird, с помощью восстанавливающего оператора $\mathbf{R}$, пересчитывался в частотный спектр с использованием дисперсионного соотношения для гравитационных волн по методике, описанной в работе (Бондур и др., 2016б). Одномерный разрез двумерного спектра строился с использованием формулы (4). Этот одномерный разрез спектра, полученный по космическому изображению, сравнивался с частотным спектром волнения, измеренным волновым буюм.

На рис. 2 представлены результаты дистанционных и контактных измерений, полученных в комплексном эксперименте, проведенном 14 сентября 2003 г. в акватории бухты Мамала (остров Оаху, Гавайи). На этом рисунке приведены: фрагмент космического изображения морской поверхности (размер 4096×4096 пикселей (а)); двумерный пространственный спектр этого фрагмента (б); частотный спектр волнения, полученный по результатам измерений с помощью одного из дрейфующих волновых буев (в).

Результаты сопоставления спектра морского волнения, полученного контактным методом и путем восстановления спектра поверхностных волн по спектру фрагмента космического изобра-

жения с использованием предложенного метода, приведены на рис. 3 для диапазона частот $0.29\text{--}0.59$ Гц, соответствующего диапазону длин волн $4.5\text{--}20$ м (включающему спектральный максимум) (а) и диапазона частот $0.4\text{--}0.59$ Гц, соответствующего диапазону длин волн $4.5\text{--}10$ м (диапазон степенного спада спектра) (б).

Анализ рис. 3, а показывает, что в диапазоне частот $0.29\text{--}0.59$ Гц, соответствующем диапазону длин волн $4.5\text{--}20$ м, наблюдается хорошее соответствие формы спектра в области спектрального максимума между данными дистанционных и контактных измерений. Количественные характеристики соответствия оценивались в частотном диапазоне степенного спада спектра $0.4\text{--}0.59$ Гц, соответствующем диапазону длин волн $4.5\text{--}10$ м. В этом диапазоне наблюдается хорошее совпадение между линиями линейной регрессии, проведенными в логарифмической шкале для спектров волнения, измеренных дистанционным ($\text{Lin}(\mathbf{R})$), и контактным ($\text{Lin}(\mathbf{B})$) методами (см. рис. 3, б). Расхождение в наклонах линий регрессии составляет 0.002 . Коэффициент достоверности линейной аппроксимации спектров в логарифмических координатах R^2 составляет: $R^2 = 0.999$ для частотного спектра, пересчитанного из пространственного спектра, восстановленного по спутниковому изображению и $R^2 = 0.897$ для частотного спектра, полученного по данным измерений с помощью волновых буев.

В результате сопоставления, выполненного в диапазоне длин волн, соответствующем степенному спада спектра ($4.5\text{--}10$ м), была получена поправка для параметра a_1 в формуле (2). Полученная поправка соответствует условиям волнообразования в исследуемой акватории бухты Мамала, когда наблюдалось смешанное волнение, включающее как ветровые волны в условиях большого разгона, так и системы волн зыби. С учетом полученной поправки значение второй итерации этого параметра для условий развивающегося волнения составило $a_{1(2)} = -0.05$. Значение первой итерации этого параметра, полученное ранее в условиях ограниченного ветрового разгона, составляло $a_{1(1)} = -0.43$.

Аналогичные исследования были проведены в 2019 г. с использованием панхроматических оптических космических изображений, полученных с борта спутника “Ресурс-П” с пространственным разрешением 1 м, а также результатов измерений спектров волнения и скоростей приповерхностного ветра со стационарных буев NOAA, расположенных вблизи Гавайских островов (см. рис. 1, б).

Космические изображения, полученные в октябре и ноябре 2019 года с борта спутника Ресурс-П, охватывали поверхность океана в районе расположения буев 51002 и 51003. На рис. 4, а приведен отобранный для анализа фрагмент (размер $2048 \times$

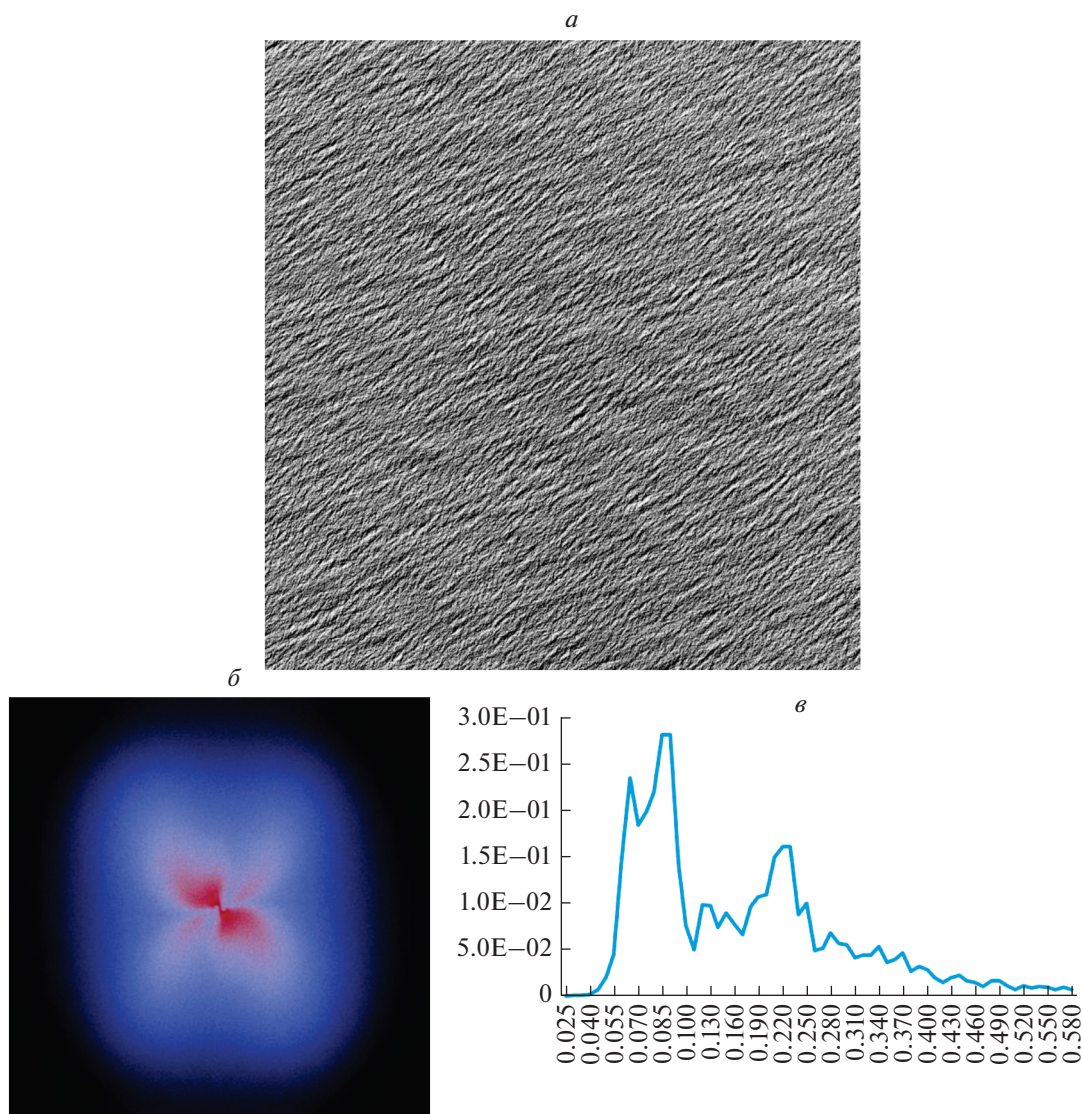


Рис. 2. Результаты дистанционных и контактных измерений, полученные в комплексном эксперименте, проведенном 14 сентября 2003 г. в акватории бухты Мамала (остров Оаху, Гавайи): *a* — фрагмент космического изображения (размер 4096×4096 пикселей), полученного с борта спутника QuickBird; *б* — двумерный пространственный спектр фрагмента этого космического изображения; *в* — частотный спектр волнения, полученный по результатам измерений с помощью волнового буй.

$\times 2048$ пикселей) космического изображения с выделенными безоблачными участками, полученного 20 ноября 2019 г. в 23:55 (GMT) в районе буя NOAA 51003. Буй установлен на расстоянии 370 км от берега. Анализ выбранного фрагмента космического изображения показывает, что поверхностное волнение в его пределах носит однородный характер, без явных признаков фронтов, рефракции волн, следов движения судов и пр. Во время проведения комплексного эксперимента в исследуемой акватории Тихого океана наблюдалось смешанное волнение, включающее как ветровые волны, так и волны зыби, зародившиеся в близлежащих акваториях. Скорость ветра, изме-

ренная с буя NOAA 51003 (усредненная за 8 мин) в 23:50 GMT составила 7 м/с, а направление ветра составляло 57° . За трехчасовой период (с 20:50 до 23:50 GMT), предшествующий съемке со спутника Ресурс-П, колебания скорости ветра составили 6.1–7.2 м/с, а направление ветра изменялось в пределах 56° – 80° .

На рис. 4, б, в приведены также данные для сопоставления результатов дистанционных и контактных измерений, полученных в эксперименте, проведенном 20 ноября 2019, включающие пространственный спектр, осредненный по двум участкам фрагмента космического изображения, использованного для восстановления спектра

морского волнения (δ), а также частотный спектр волнения, измеренный буем NOAA 51003 (ϵ). Пространственный спектр, приведенный на рис. 4б демонстрирует наличие двух систем волн в зоне проведения эксперимента.

В результате обработки выбранных участков фрагмента космического изображения, полученного аппаратурой спутника “Ресурс-П”, были получены следующие результаты.

Так же, как и в описанном выше комплексном эксперименте, проведенном в акватории бухты Мамала, двумерный пространственный спектр возвышений морской поверхности, полученный по космическому изображению (спутник “Ресурс-П”) с использованием восстанавливающего оператора **R** (формула (2)), пересчитывался в одномерный частотный спектр с использованием дисперсионного соотношения для гравитационных волн по методике, приведенной в (Бондур и др., 2016б), и формулы (4). Для восстановления пространственного спектра морских волн по космическому изображению, полученному со спутника “Ресурс-П”, использовался пространственно-частотный фильтр, адаптированный к условиям волнообразования в исследуемой акватории, где наблюдалось смешанное волнение, включающее как ветровые волны в условиях значительного разгона, так и системы волн зыби. При этом в формуле (2) для восстанавливающего оператора **R** использовался параметр $a_1 = -0.05$ с учетом поправки, полученной ранее по космическим данным спутника QuickBird для условий волнообразования в акватории бухты Мамала, где наблюдалось смешанное волнение, включающее как развивающиеся ветровые волны, так и системы волн зыби. Возможность использования одинаковых параметров пространственно-частотного фильтра является обоснованной, поскольку панхроматические сенсоры этих двух космических аппаратов имеют близкие характеристики, как по пространственному разрешению, так и по спектральной чувствительности.

Примеры сопоставления спектров морского волнения, полученных в этом эксперименте контактным методом и путем восстановления по спектру космического изображения с использованием предложенного метода, приведены на рис. 5. Сопоставление проводилось для диапазона частот 0.29–0.59 Гц, соответствующего диапазону длин волн 4.5–20 м (область спектральных максимумов), и диапазона частот 0.4–0.59 Гц, соответствующего диапазону длин волн 4.5–10 м (диапазон степенного спада спектра).

Анализ рис. 5, а показывает, что в диапазоне частот 0.29–0.59 Гц, соответствующем длинам волн 4.5–20 м, наблюдается хорошее соответствие форм спектров в области спектральных

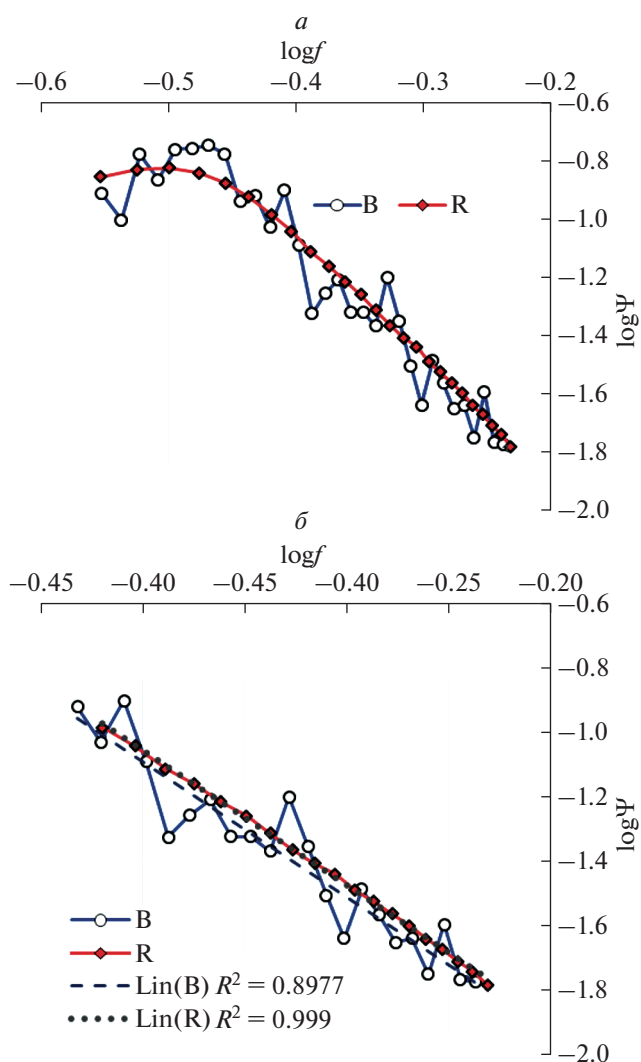


Рис. 3. Сопоставление частотного спектра волнения, измеренного с помощью волнового буя, с частотным спектром, пересчитанным из двумерного пространственного спектра возвышений, полученного по космическому изображению (спутник QuickBird) с помощью восстанавливающего оператора **R** в частотных диапазонах, соответствующих: а – диапазону длин волн 4.5–20 м, включающему спектральный максимум; б – диапазону степенного спада спектра (4.5–10 м). Обозначения: “**R**” – частотный спектр, пересчитанный из пространственного спектра, восстановленного по спутниковому изображению; “**B**” – частотный спектр, полученный с помощью волнового буя; Lin(**R**), Lin(**B**) – линии линейной регрессии частотных спектров в логарифмических координатах; R^2 – коэффициент достоверности линейной аппроксимации спектров в логарифмических координатах.

максимумов, полученных по данным дистанционных и контактных измерений.

Так же, как и при анализе данных, полученных в описанном выше комплексном эксперименте, проведенном в акватории бухты Мамала, количе-

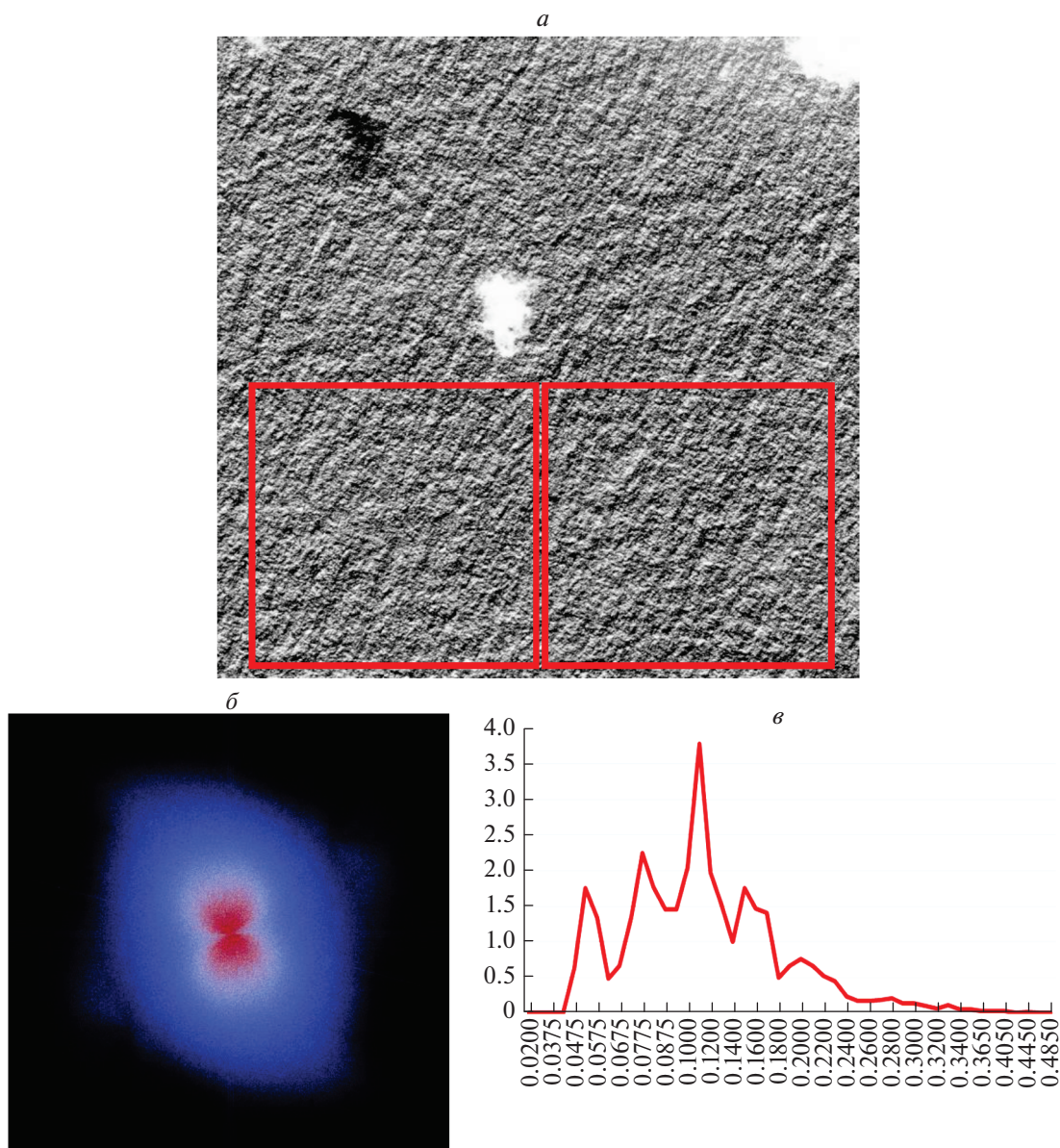


Рис. 4. *a* — отобранные безоблачные участки (выделены квадратами) фрагмента космического изображения высокого разрешения, полученного 20 ноября 2019 г. в 23:55 (GMT) со спутника “Ресурс-П” для акватории Тихого океана вблизи Гавайских островов в районе расположения буя NOAA 51003; *б* — пространственный спектр, усредненный по двум участкам фрагмента космического изображения; *в* — частотный спектр волнения, полученный по результатам измерений волновым бую NOAA 51003.

ственные характеристики соответствия оценивались в частотном диапазоне степенного спада спектров 0.4–0.59 Гц, соответствующем длинам волн 4.5–10 м. В этом диапазоне наблюдается хорошее совпадение между линиями линейной регрессии, проведенными в логарифмической шкале для спектров волнения, измеренных дистанционно по данным спутника “Ресурс-П” ($\text{Lin}(R)$), и данным контактных измерений с помощью буя NOAA 51003 ($\text{Lin}(B)$) (см. рис. 5, *б*).

Расхождение в наклонах линий регрессии составляет 0.018. Коэффициент достоверности ли-

нейной аппроксимации спектров в логарифмических координатах составляет: $R^2 = 0.9415$ для частотного спектра, пересчитанного из пространственного спектра, восстановленного по спутниковому изображению и $R^2 = 0.8261$ для частотного спектра, полученного по данным измерений с помощью волнового буя.

Приведенные результаты демонстрируют возможности использования восстанавливающего оператора в форме (2) с параметрами, адаптированными к различным условиям волнообразова-

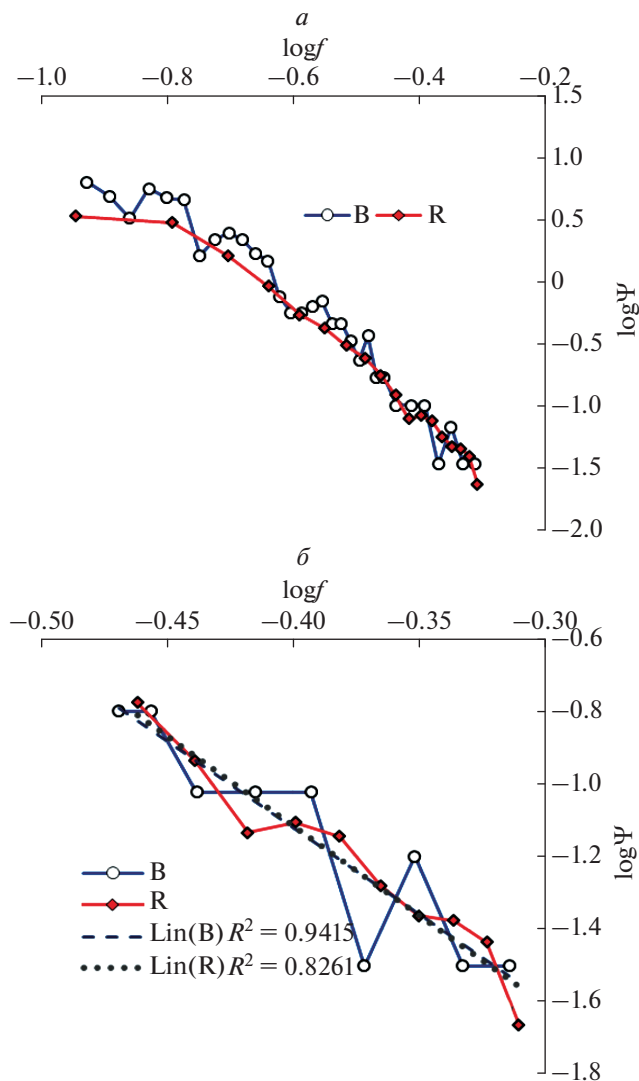


Рис. 5. Сопоставление частотного спектра волнения, измеренного с помощью волнового буя NOAA 51003, с частотным спектром, полученным из двумерного пространственного спектра возвышений, восстановленного по космическому изображению (спутник “Ресурс-П”), с помощью оператора **R**: *a* – в диапазоне частот 0.29–0.59 Гц (длины волн 4.5–20 м), включающем спектральный максимум; *b* – в частотном диапазоне степенного спада спектра 0.4–0.59 Гц (длины волн 4.5–10 м). Обозначения: “**R**” – частотный спектр, пересчитанный из пространственного спектра, восстановленного по спутниковому изображению; “**B**” – частотный спектр, полученный с помощью волнового буя; $\text{Lin}(R)$, $\text{Lin}(B)$ – линии линейной регрессии частотных спектров в логарифмических координатах; R^2 – коэффициент достоверности линейной аппроксимации спектров в логарифмических координатах.

ния, для дистанционного измерения спектров морского волнения по космическим изображениям высокого пространственного разрешения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенных исследований развит метод восстановления спектров морского волнения по спектрам оптических космических изображений высокого пространственного разрешения, получаемых с борта различных космических аппаратов для широкого набора условий волнообразования. Метод основан на использовании восстанавливающих операторов, формируемых в виде пространственно-частотных фильтров, параметры которых адаптируются к конкретным условиям.

Предложенный метод апробирован путем сопоставления спектров морского волнения в диапазоне частот 0.29–0.59 Гц (длины волн 4.5–20 м), восстановленных по космическим изображениям высокого пространственного разрешения, полученным с борта спутников QuickBird и “Ресурс-П”, а также спектров волнения, зарегистрированным с помощью дрейфующих и заякоренных волновых буй в процессе проведения комплексных экспериментов в акваториях Тихого океана в районе Гавайских островов в 2003 и 2019 годах. В результате проведенного сопоставления продемонстрировано хорошее соответствие спектров волнения, зарегистрированных различными методами в области спектральных максимумов. Установлено, что в диапазоне частот 0.4–0.59 Гц (длины волн 4.5–10 м), соответствующем степенному спада спектров, расхождение в наклонах линий линейной регрессии (в логарифмических координатах) для спектров волнения, полученных дистанционными и контактными методами, составляет 0.018–0.002. При этом коэффициенты достоверности линейных аппроксимаций спектров волнения составляют 0.942–0.999 для спектров, восстановленных по космическим изображениям, и 0.83–0.9 для спектров, полученных контактными методами с помощью волновых буй.

На основании сопоставления космических данных с результатами измерений, выполненных с использованием волновых буй, 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 (длительный разгон, система волн, содержащая ветровые волны и различные волны зыби). При этом значение такого параметра для условий ограниченного разгона составляло $a_1 = -0.43$.

Проведенные исследования продемонстрировали целесообразность применения разработанных методов восстановления спектров уклонов и возвышений морской поверхности по спектрам космических изображений высокого простран-

ственного разрешения, адаптированных к различным условиям волнообразования. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов оперативного космического мониторинга спектров морского волнения для исследования различных процессов и явлений, происходящих на обширных акваториях морей и океанов, а также высокопроизводительных методов обработки больших объемов данных, получаемых при таком мониторинге, в том числе с использованием параллельных вычислений (Воробьев и др., 2020).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0312).

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 нефтегазовых 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. 2000. № 5. С. 28–44.
- 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., 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., Игнатьев 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., 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.
- Ветер, волны и морские порты / под ред. Ю.М. Крылова. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
- Воробьев В.Е., Мурынин А.Б., Хачатрян К.С.* Высокопроизводительная регистрация пространственных спектров морского волнения при оперативном космическом мониторинге обширных акваторий // Исследование Земли из космоса, 2020. № 2. С. 56–68 (в печати).
- Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Ветровое волнение в Мировом Океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.
- Крылов Ю.М., Стрекалов С.С., Цыплухин В.Ф.* Ветровое волнение и их воздействие на сооружения. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 255 с.
- Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д.* Абразия морских берегов России // Вестник московского университета. Серия 5: География. 2009. № 4. С. 40–44.
- Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 376 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.
- Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в морях и океанах. Под ред. Нестерова Е.С. М.: Росгидромет, 2013. 337 с.
- 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.

Халфин И.Ш. Воздействие волн на морские нефтегазо-промысловые сооружения. М.: Недра, 1990. 313 с.

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. 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.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.

Chelton D.B. et al. On the use of QuikSCAT scattometer measurements of surface Wind for marine Weather prediction // J. Amer. Met. Soc. 2006. V. 134. P. 2055–2071.

Collard F., Ardhuim F., Chapron B. Routine monitoring and analysis of ocean swell fields using a spaceborne SAR // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. <https://doi.org/10.1029/2008GL037030>

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

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 Sea Wave Spectra Using High Resolution Satellite Imagery under Various Conditions of Wave Generation

V. G. Bondur¹, V. E. Vorobyev¹, and A. B. Murynin^{1,2}

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

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

A method has been developed to retrieve sea wave spectra using high resolution satellite imagery with regard to various conditions of wave generation. The method is based on the use of retrieving operators formed as spatial-frequency filters the parameters of which are adapted to real conditions. The adequacy of the method was validated using data obtained during comprehensive experiments in the coastal water areas of the Black Sea near the Crimean Peninsula and in open water areas of the Pacific near Hawaii through the comparison of 0.29–0.59 Hz (4.5–20 m wavelengths) wave spectra retrieved using QuickBird and Resource-P satellite imagery, as well as the spectra obtained by wave buoys. On the base of the experimental results, the value of retrieving spatial-frequency filter parameter for the power-law decay of the wave frequency spectrum was specified. This value is equal –0.05 with regard to complicated wave generation conditions (prolonged wind acceleration, a wave system containing wind waves and swell) which differs from the obtained earlier values of –0.43 in conditions of limited wind acceleration.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, wave spectra, wavy water surface, retrieving operator, satellite imagery, wave buoy

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. Phase-Spectral Method's Modeling of Two-Dimension Stochastic Brightness Field Formed at the Air-space Apparatus Entrance // Issledovanie Zemli iz Kosmosa, 2000. № 5. P. 28–44.

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.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. 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., 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*. 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 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 877–887. doi: 10.1134/S0001433816090085
- Bondur V.G., Murynin A.B. Restoration of surface waves spectra from the spectra of images with the account for non-linear modulation of the brightness field // *Optika atmosfery i Okeana*. 1991. V. 4. № 4. P. 387–393
- 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., Sharkov E.A. Statistical characteristics of foam formations on a disturbed sea-surface // *Okeanologiya*. 1982. V. 22. № 3. P. 372–379.
- 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 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49. № 9. P. 886–896. doi: 10.1134/S000143381309003X
- Chelton D.B. et al. On the use of QuikSCAT scatterometer measurements of surface Wind for marine Weather prediction // *J. Amer. Met. Soc.* 2006. V. 134. P. 2055–2071.
- Collard F., Ardhuim F., Chapron B. Routine monitoring and analysis of ocean swell fields using a spaceborne SAR // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. doi: 10.1029/2008GL037030.
- Davidan I.N., Lopatukhin L.I., Rozhkov V.A. Vetrovye volnenie v Mirovom Okeane [Wind waves in the World Ocean]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 256 p. (In Russian).
- Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004. P. 53–58.
- Khalfin I.Sh. Vozdejstvie voln na morskoe neftegazopromyslovyye sooruzheniya [Wave impacts on marine oil and gas exploration facilities]. Moscow: Nedra, 1990. 313 p. (In Russian).
- Krylov Yu.M., Strekalov S.S., Tsyplukhin V.F. Vetrovye volnenie i ikh vozdejstvie na sooruzheniya [Wind waves and their impact on constructions]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 255 p. (In Russian).
- Lukyanova S.A., Soloveva G.D. Abraziya morskikh beregov Rossii [Abrasion of marine coast of Russia] // *Vestnik moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2009. № 4. P. 40–44. (In Russian).
- Monin A.S., Krasitskij V.P. Yavleniya na poverkhnosti okeana [Phenomena on the ocean surface]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1985. 376 p. (In Russian).
- 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] // *Issledovanie 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 non-linear model] // *Issledovanie 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 // *Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics*. 2018. V. 54. № 4. P. 394–403.
- Rezhim, diafniz i prognoz vetrovogo volneniya v moryakh i okeanakh [Mode, diafniz, and forecast of wind waves in seas and oceans] / Ed. by Nesterov. Moscow: Rosgidromet. 2013. 337 p. (In Russian).
- Toba J. Local balance in the air-sea boundary process // *Oceanogr. Soc. Japan*. 1973. V. 29. P. 209–225.
- Trubkin I.P. Vetrovye volnenie. Vzaimodeystvie i raschet veroyatnostnykh kharakteristik [Wind waves. Interaction and calculation of probability characteristics] Moscow: Nauchny mir, 2007. 264 p. (In Russian).
- Veter, volny i morskoe porty [Wind, waves and sea ports] / Ed. by Krylov Yu.M. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 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] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020 (In Russian) (In Press).
- 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>