

Измерение статистических характеристик морской поверхности с помощью подводного акустического волнографа в Чёрном море и сравнение с ADCP

М. С. Рябкова¹, Ю. А. Титченко¹, В. Ю. Караев¹, Е. М. Мешков¹,
Р. В. Беляев¹, А. А. Яблоков¹, В. И. Баранов², В. В. Очередник²

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mail: mrjabkova@gmail.com

² *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mails: baranovvlad@mail.ru, v.ochednik@ocean.ru

В статье приведено сравнение статистических характеристик поверхностного волнения, измеренных подводным акустическим волнографом и акустическим доплеровским измерителем течения (ADCP) в ходе проведения долгосрочного мониторинга состояния морской поверхности на полигоне «Геленджик» в Чёрном море. Акустический волнограф был установлен на полигоне «Геленджик» Южного отделения Института океанологии РАН в 2019 г. Для измерения волнения на полигоне применяется ADCP RDI WHS-600 с функцией измерения волнения. Оба прибора работают в ультразвуковом диапазоне частот, однако используют разные схемы измерений. Подводный акустический волнограф определяет расстояние до поверхности по времени прихода отражённого сигнала вертикального канала, а в ADCP используются измерения отражённого акустического сигнала с четырёх наклонных излучателей (режим Echo) и измеренный спектр скоростей (режим Velocity). Акустический волнограф измеряет ненаправленный спектр волнения, а ADCP позволяет определить направленный спектр волнения. По измеренному ADCP спектру волнения можно рассчитать параметры крупных волн (>12 м). Было проведено сравнение спектров волнения и вычисленных по ним интегральных характеристик: высоты значительного волнения, дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости, значительного и среднего периодов волнения за 1–10 февраля 2020 г. Показано, что статистические характеристики волнения, измеренные двумя приборами, близки. Измерения подводного акустического волнографа и результаты работы двух разных алгоритмов обработки данных ADCP (в режимах Echo и Velocity) различаются не сильнее, чем измерения двух алгоритмов между собой. Спектры, измеренные двумя приборами, различаются в области пика, но спадают одинаково. Однако спектры, восстановленные разными методами по данным ADCP, также различаются, что позволяет предположить, что в данном случае форма восстанавливаемого спектра существенно зависит от алгоритма обработки. В дальнейшем планируется рассмотреть этот вопрос подробнее и провести сравнение измерений подводного акустического волнографа с измерениями струнного волнографа.

Ключевые слова: морская поверхность, ADCP, подводный акустический волнограф, значительная высота волнения, период волнения, спектр волн, ветровые волны, дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости, значительный период волнения, средний период волнения

Одобрена к печати: 30.10.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-189-204

Введение

В настоящее время космическая радиолокация предоставляет основной объём информации о приповерхностном слое Мирового океана и успешно применяется для решения широкого круга задач, связанных с обеспечением безопасности жизнедеятельности человека в прибрежной зоне, судоходства, сельскохозяйственной деятельности и метеорологии.

С 1990-х гг. спутниковые альтиметры и скаттерометры формируют непрерывную серию измерений поля ветра и значительной высоты волны SWH (*англ.* significant wave height) в Мировом океане.

Свойства сигнала, рассеянного морской поверхностью, полностью определяются параметрами поверхностных волн. Особенностью обратного рассеяния сверхвысокочастотных

(СВЧ) волн является необходимость учёта влияния всего спектра волн: от больших гравитационных до малых капиллярных (ряби). Свойства обратного рассеяния будут изменяться в зависимости от угла падения.

Скаттерометры выполняют измерения при средних углах падения, что обеспечивает высокую чувствительность радиолокационного сечения обратного рассеяния к скорости ветра. Это связано с резонансным механизмом обратного рассеяния, который является доминирующим при средних углах падения (Bass, Fuks, 1979; Valenzuela, 1978). Короткие волны (сантиметры – дециметры) быстро откликаются на изменение скорости ветра. Сечение обратного рассеяния пропорционально спектральной плотности резонансной ряби, поэтому оно также быстро «реагирует» на изменение скорости ветра.

В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности спектр морских волн делится на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющую в зависимости от длины волны излучения (Bass, Fuks, 1979; Valenzuela, 1978). Влияние крупномасштабных волн на спектральные и энергетические характеристики отражённого сигнала проявляется через модуляцию наклонами (изменение локального угла падения) и гидродинамическую модуляцию (изменение спектральной плотности ряби по профилю крупномасштабного волнения). Это делает неоднозначной связь между спектральной плотностью ряби (скоростью ветра) и сечением обратного рассеяния. Ещё более усложняет решение обратной задачи появление волн зыби (случай смешанного волнения), которая не связана с локальной скоростью ветра, но изменяет характеристики крупномасштабных волн, т. е. влияет на обратное рассеяние (Karaev et al., 2016).

Для решения обратной задачи построены регрессионные модели, связывающие сечение обратного рассеяния, измеренное скаттерометром, со скоростью и направлением ветра, измеренными морскими буйами. В результате для восстановления поля ветра в скаттерометрии строятся геофизические модельные функции (Hersbach, 2010; Mouche, Chapron, 2015; Stoffelen, Anderson, 1997). Регрессионный подход позволяет определять скорость ветра с точностью порядка 2 м/с. Для более точного восстановления скорости ветра необходима дополнительная информация о рассеивающей поверхности, например о дисперсии уклонов крупномасштабных волн (Lemaire et al., 1999).

Спутниковые альтиметры выполняют измерения в надир, когда преобладает механизм квазизеркального отражения, и одной из задач радиовысотомера является измерение SWH. Высота морских волн не влияет напрямую на сечение обратного рассеяния и параметры доплеровского спектра, поэтому для измерения высоты волнения используют передний фронт отражённого импульса. Форма отражённого импульса зависит от SWH (Brown, 1977). Для оценки периода волн используются простые эмпирические регрессии (Gommenginger et al., 2003; Quilfen et al., 2004), полуэмпирические модели, основанные на эмпирическом законе роста ветрового волнения (Hwang et al., 1998), и полностью аналитические модели (Badulin, 2014). Традиционно для проверки данных радиолокационных высотометров используются данные морских буйев, которые измеряют частотный спектр морских волн, по которому в ходе интегрирования можно рассчитать SWH.

По данным измерений радаров с синтезированной апертурой антенны (РСА) могут быть восстановлены направленные спектры поверхностных волн (Chapron et al., 2001; Hasselmann et al., 1996; Zhang et al., 2015) и некоторые параметры волн (Romeiser et al., 2015; Schulz-Stellenfleth et al., 2007; Wang et al., 2018). РСА обладает высоким пространственным разрешением над сушей — порядка нескольких метров. В то же время существенное ограничение алгоритмов восстановления спектров морских волн с использованием измерений РСА связано с ограничением минимальной длины морской волны (разрешения), которая может быть восстановлена. Волны длиной более 100–150 м можно восстановить с достаточной уверенностью, но возможность измерения более коротких волн (несколько десятков метров) зависит от интенсивности волнения. Дело в том, что существуют «физические» ограничения эффективного разрешения РСА, связанные с движением морской поверхности (орбитальными скоростями). Для проверки разработанных алгоритмов обычно используются данные морских буйев. Надо отметить, что по РСА-изображению определяется только форма спектра волнения

(как и по фотографии), а для оценки высоты волнения необходима дополнительная информация или ряд предположений, которые используются при последующей обработке.

Измеряемые параметры волн (SWH, период волны) и скорость ветра не оказывают непосредственного влияния на сечение обратного рассеяния и доплеровский спектр. Поэтому применяемые алгоритмы получены в результате регрессионного анализа радиолокационных данных и контактных измерений. Накопление данных подспутниковых измерений повышает точность алгоритмов. Оценка качества восстанавливаемой тематической информации невозможна без проведения постоянной валидации и верификации по данным контактных измерений, которые выполняют морские буи, струнные волнографы, ADCP (*англ.* Acoustic Doppler Current Profilers, акустический доплеровский измеритель течения) и новый подводный акустический волнограф.

Для измерения параметров волнения разработаны разнообразные виды волнографов (см., например, учебное пособие (Коровин, 2007)). Наиболее точными являются струнные и лазерные волнографы. Однако они имеют существенный недостаток, который заключается в необходимости крепления приборов неподвижно, что резко ограничивает возможность их применения в открытом море в автономном режиме.

Достоверными источниками данных о поверхностном волнении являются морские буи, расположенные в разных акваториях Мирового океана (Handbook..., 2009). Помимо спектра крупномасштабного волнения, буи измеряют следующие важные характеристики приповерхностного слоя: скорость и направление ветра, температуру воды и воздуха, интенсивность осадков. Однако буи могут измерять только параметры крупных волн. Их использование затруднено в замерзающих водоёмах и во время штормов.

Для всепогодного мониторинга ветрового волнения предлагается использовать подводный акустический волнограф. Акустический волнограф устанавливается вблизи дна (или на подводной плавучей платформе) и ориентирован вертикально вверх на водную поверхность.

Прибор включает в себя два канала: импульсный высотомер, излучающий и принимающий акустические импульсы, и доплеровский гидролокатор, излучающий непрерывный гармонический сигнал и позволяющий измерять доплеровский спектр отражённого акустического сигнала. Измерения в разных каналах выполняются последовательно. Рабочая частота прибора — 200 кГц. В работах (Караев и др., 2010; Титченко, Караев, 2012) предлагается метод определения статистических моментов второго порядка крупномасштабного (по сравнению с длиной волны акустического излучения) волнения по измерениям доплеровского спектра. В исследованиях (Ryabkova et al., 2019; Titchenko et al., 2015, 2019b) показано, что измерения доплеровского спектра отражённого акустического сигнала при малых углах падения позволяют определять статистические параметры поверхности, входящие в теоретическую модель доплеровского спектра, полученную в рамках метода Кирхгофа (Караев и др., 2019). Там же показано, что измерения параметров волнения с помощью акустического волнографа и струнного волнографа близки. В работе (Караев и др., 2014) предложен метод определения высоты волнения и дисперсии уклонов по форме отражённого акустического импульса. В публикации (Titchenko et al., 2019a) приведены результаты работы метода для натуральных измерений, проведённых в Чёрном море на полигоне «Геленджик» (Баранов и др., 2015). Также прибор можно использовать в замерзающих водоёмах для определения толщины ледяного покрова (Titchenko et al., 2019c). Подводный акустический волнограф предлагается использовать для валидации данных дистанционного зондирования, в частности измерения высоты значительного волнения с помощью спутниковых альтиметров. В настоящий момент для такой валидации используются данные морских буев (Wang et al., 2020; Yang, Zhang, 2019), расположенных на значительном удалении от берега. Сейчас подводный акустический волнограф расположен на расстоянии около 1 км от берега, поэтому провести сравнение с альтиметрами невозможно из-за влияния берега на форму отражённого импульса.

Ранее проводились сравнения измерений ADCP и морских буев в натуральных экспериментах. В работах (Dally, Osiecki, 2004; Strong et al., 2000) показано, что измерения параметров волнения и ненаправленных спектров волнения морскими буями разных компаний совпадают с измерениями ADCP. Поэтому сравнение с ADCP позволит оценить возможность

использования подводного акустического волнографа для валидации альтиметрических данных.

ADCP широко используется для измерения профиля течения в водной толще и высоты волнения. В эксперименте применялся прибор Workhorse Sentinel компании Teledyne RD Instruments с частотой 600 кГц. Прибор оснащён четырьмя излучателями, ориентированными под углом 20° к вертикали в разные стороны. В технической документации от производителя (Acoustic..., 2011) описывается общий принцип работы прибора: он периодически излучает звуковой сигнал определённой частоты, который отражается от планктона и мелких пузырьков воздуха. Измеряя смещение частоты отражённого сигнала относительно частоты базового сигнала и время его прихода, можно получить оценку скорости течения на определённой глубине. В работе (Terray et al., 1998) описывается метод *agray method*, используемый для определения частотно-углового спектра высоты крупных морских волн по измерениям наклонных излучателей. Метод позволяет определить приповерхностные орбитальные скорости по измерениям скорости течения ближе к поверхности воды.

В настоящей работе проведено экспериментальное сравнение подходов определения спектров волнения, полученных по данным подводного акустического волнографа и ADCP компании RDI WHS-600. Оба прибора установлены на полигоне «Геленджик» Южного отделения Института океанографии (ИО ИО) РАН (Зацепин и др., 2014) и при помощи кабельной системы берегового мониторинга состояния водной среды в режиме реального времени (Баранов и др., 2015) выполняют долгосрочные измерения параметров поверхностного волнения. В данном исследовании приведено сравнение ненаправленных спектров волнения, измеряемых подводным акустическим волнографом и ADCP, а также сравнение интегральных характеристик: высоты значительного волнения, среднего периода волнения, значительного периода волнения, дисперсии вертикальной составляющей орбитальных скоростей. Для сравнения был взят период активного волнения с 1 по 10 февраля 2020 г.

Место проведения эксперимента и используемые приборы

Акустический доплеровский профилограф течений ADCP RDI WHS-600 с функцией измерения волнения и подводный акустический волнограф входят в состав многофункциональной системы онлайн-мониторинга параметров водной среды, установленной на полигоне «Геленджик» на расстоянии 1 км от берега (красная звёздочка ДС1 ближе к берегу на *рис. 1а*, см. с. 193). В состав комплекса входят также стационарная станция вертикального зондирования (ССВЗ на *рис. 1б*) и термокоса. Данные передаются от приборов к системному блоку сбора данных (On-line st. на *рис. 1б*) и далее по оптоволоконному кабелю на береговой компьютер, откуда их можно скачать по сети интернет. На *рис. 1а* приведена общая схема полигона. Подводный акустический волнограф «Кальмар» и RDI WHS-600 установлены на донной станции на глубине 28 м, расстояние между приборами составляет 60 м (см. *рис. 1б*). Внешний вид RDI WHS-600 показан на *рис. 1г*, красные круги — гидроакустические излучатели. Рабочая частота — 600 кГц, диаграмма направленности — менее 2° . Скорость движения воды определяется каждые 30 с вертикальным разрешением 0,5 м. Измерение волнения проводится в течение 40 мин.

На схеме на *рис. 1а* используются следующие обозначения: треугольники — донные станции в составе ADCP и термокосы; квадрат — станция профилографа «Аквалог»; звёздочки — морские метеостанции; ромбы — наземные метеостанции; пунктирная ломанная — галсы судна для измерения пространственной структуры течений буксируемым ADCP.

На полигоне установлен подводный акустический волнограф «Кальмар» (внешний вид прибора показан на *рис. 1б*). Прибор оснащён гидролокаторами, обеспечивающими работу в импульсном (красный гидролокатор на *рис. 1в*) и непрерывном (два белых гидролокатора на *рис. 1в*) режимах. «Пирамида» с закреплённым акустическим волнографом установлена на дне таким образом, чтобы приёмо-передающая антенна импульсного гидролокатора была ориентирована в зенит (на морскую поверхность). Гидролокатор (частота генератора 200 кГц)

излучает импульсы длительностью от 5 до 40 мкс, частота следования импульсов равна 2 Гц. Раскрытие симметричной диаграммы направленности приёмно-передающей антенны составляет 15° . Таким образом, диаметр круга на поверхности воды, определяемый диаграммой направленности, приблизительно равен 7,4 м. Антенный блок непрерывного канала ориентирован под углом $4-6^\circ$ от вертикали. В непрерывном режиме волнограф излучает гармонический сигнал с частотой 200 кГц и измеряет доплеровский спектр сигнала, отражённого водной поверхностью.

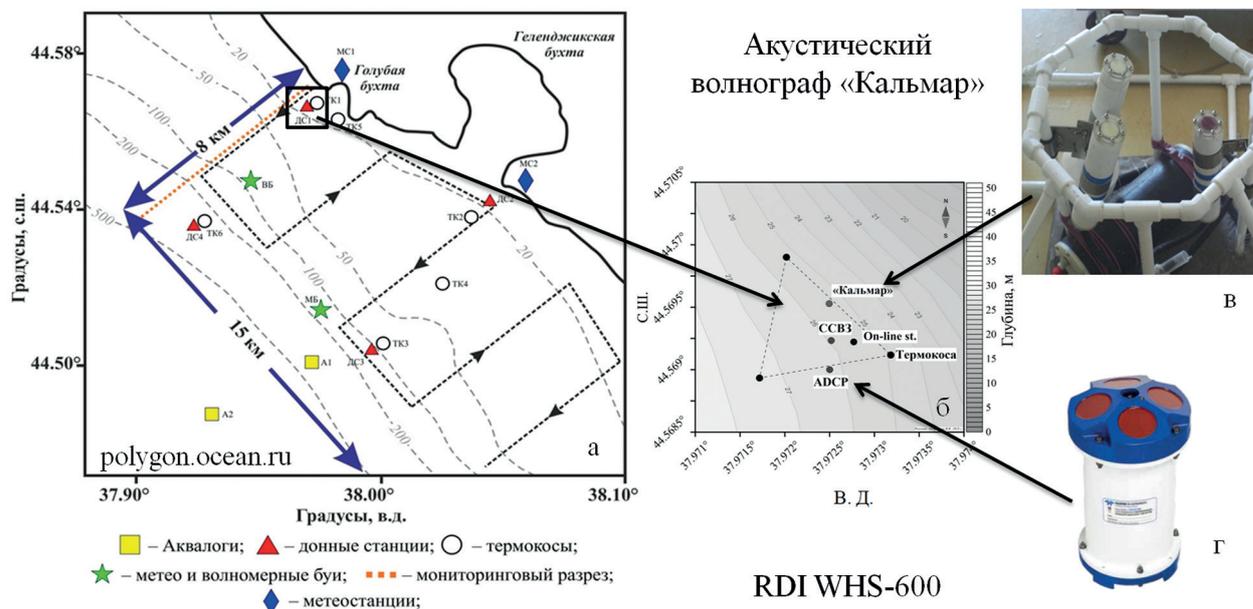


Рис. 1. Схема полигона по состоянию на 2020 г. и внешний вид приборов

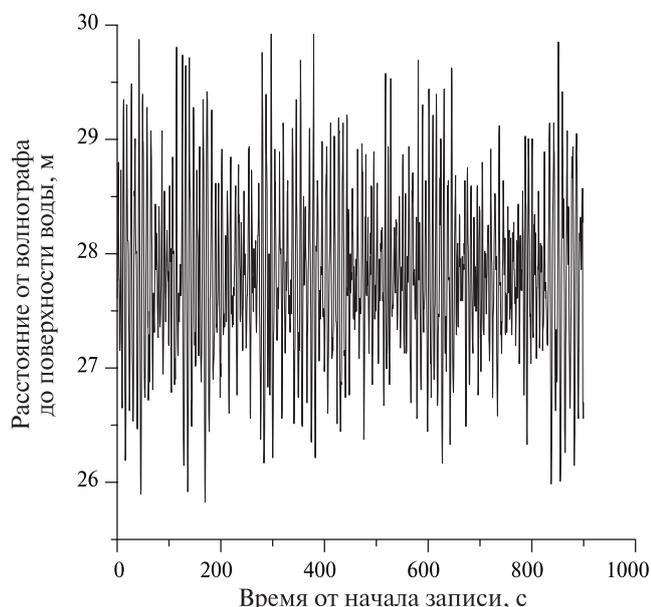


Рис. 2. Временная зависимость расстояния от акустического волнографа до поверхности воды. Запись от 05.02.2020, 20:58–21:13 (на рисунке указано время от начала записи)

Сеанс измерения в импульсном режиме составлял 15 мин. Расстояние до поверхности определяется по времени прихода максимума отражённого импульса. На рис. 2 показана временная зависимость расстояния от волнографа до морской поверхности.

При обработке сеанс записи разбивается на части по 128 с, для каждой части записи вычисляется среднее и вычитается. Для вычисления энергетического спектра каждой части записи используется метод Уэлча (Welch, 1967) с окном Ханна (*англ.* Hann window) (Essenwanger, 1986). Средний спектр для сеанса (всей записи) находится как среднее из спектров, вычисленных для перекрывающихся участков записи (перекрывание составляет 50 %). Это позволяет уменьшить шум в спектре.

Спектр волнения и интегральные характеристики

RDI WHS-600 измеряет спектр волнения тремя способами: по данным измерения отражения от поверхности воды в боковых каналах (Echo), с использованием пересчёта спектра скоростей в спектр возвышений (Velocity) и по измерениям датчика давления (Pressure). В документации к программе обработки данных ADCP (Waves..., 2001) описаны все три метода. В настоящей работе рассматриваются только спектры, полученные по данным гидроакустических излучателей. Пример спектров, измеренных акустическим волнографом и RDI WHS-600, приведён на *рис. 3*.

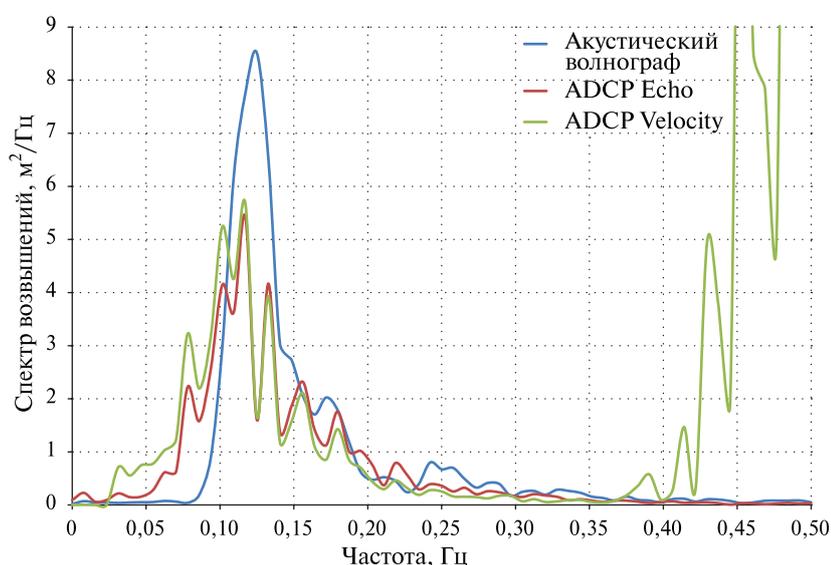


Рис. 3. Спектр возвышений, восстановленный по измерениям акустического волнографа (синяя кривая) и измерениям ADCP: красная кривая — спектр Echo, зелёная — спектр Velocity. Запись от 05.02.2020, 20:58–21:13 (акустический волнограф), 20:21–21:01 (ADCP)

Из *рис. 3* видно, что при частотах выше 0,35 Гц спектр Velocity (зелёная кривая) начинает резко возрастать; таким образом, при расчётах интегральных характеристик спектры будут ограничены частотой 0,35 Гц. Эта частота соответствует длине волны 12 м, т. е. более короткие волны отбрасываются.

Время записи приборов различно: для акустического волнографа оно составляет 15 мин (этого достаточно для статистической обработки полученных измерений (Коровин, 2007)), для ADCP — 40 мин, приборы разнесены на 60 м друг от друга. Сравнение спектров и интегральных характеристик проводилось для перекрывающихся временных интервалов измерений акустического волнографа и ADCP. Если на одно измерение ADCP приходилось несколько измерений акустического волнографа, сравнение осуществлялось со средним по всем измерениям в этом временном промежутке. В случае, когда во время измерений не происходило резких изменений параметров волнения (смена ветра, приход зыби), можно считать, что разница во времени усреднения между приборами не влияет на измеренные спектры и интегральные характеристики.

Сравниваем четыре интегральных характеристики: высоту значительного волнения (формула (1)), дисперсию вертикальной составляющей орбитальной скорости σ_u^2 (формула (2)), значительный период волнения (англ. significant wave period) T_p (формула (3)) и средний период волнения (англ. mean wave period) T_m (формула (4)) по измерениям акустического волнографа и измерениям ADCP за 1–10 февраля 2020 г.

$$H_s = 4 \sqrt{\int_0^{0,35} S(f) df}, \quad (1)$$

$$\sigma_u^2 = \int_0^{0,35} S(f) f df, \quad (2)$$

$$T_p = \frac{\int_0^{0,35} S(f) df}{\int_0^{0,35} S(f) f df}, \quad (3)$$

$$T_m = \sqrt{\frac{\int_0^{0,35} S(f) df}{\int_0^{0,35} S(f) f^2 df}}. \quad (4)$$

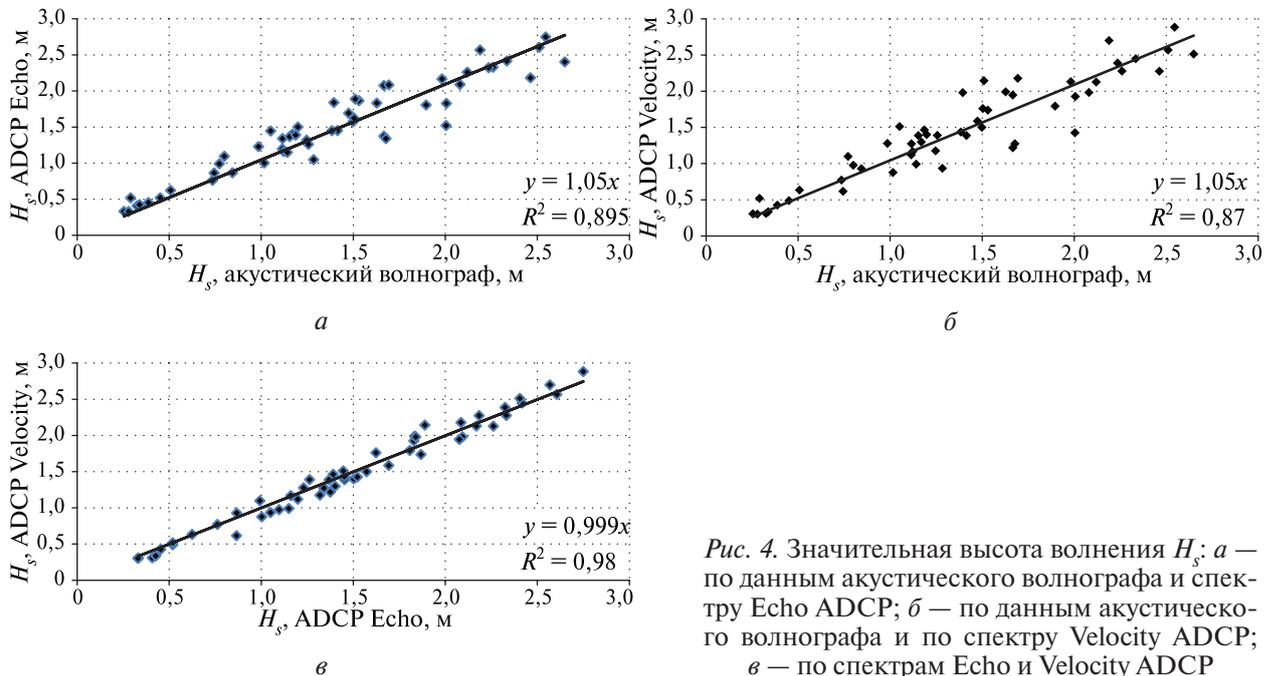


Рис. 4. Значительная высота волнения H_s : а — по данным акустического волнографа и спектру Echo ADCP; б — по данным акустического волнографа и по спектру Velocity ADCP; в — по спектрам Echo и Velocity ADCP

На рис. 4 представлено сравнение значительных высот волнения по данным акустического волнографа и спектру Echo ADCP (см. рис. 4а), по данным акустического волнографа и спектру Velocity ADCP (см. рис. 4б), по спектру Echo и спектру Velocity ADCP (см. рис. 4в) за 1–10 февраля 2020 г. На рис. 5 (см. с. 196) приведено сравнение дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости по данным акустического волнографа и спектру Echo ADCP (см. рис. 5а), по данным акустического волнографа и спектру Velocity ADCP (см. рис. 5б), по спектру Echo и спектру Velocity ADCP (см. рис. 5в) за 1–10 февраля 2020 г.

На рис. 6 (см. с.197) представлено сравнение средних периодов волнения по данным акустического волнографа и спектру Echo ADCP (см. рис. 6а, см. с. 197), по данным акустического волнографа и спектру Velocity ADCP (см. рис. 6б), по спектру Echo и спектру Velocity ADCP (см. рис. 6в) за 1–10 февраля 2020 г. На рис. 7 (см. с. 197) приведено сравнение значительных периодов волнения по данным акустического волнографа и спектру Echo ADCP(см. рис. 7а), по данным акустического волнографа и спектру Velocity ADCP (см. рис. 7б), по спектру Echo и спектру Velocity ADCP (см. рис. 7в) за 1–10 февраля 2020 г.

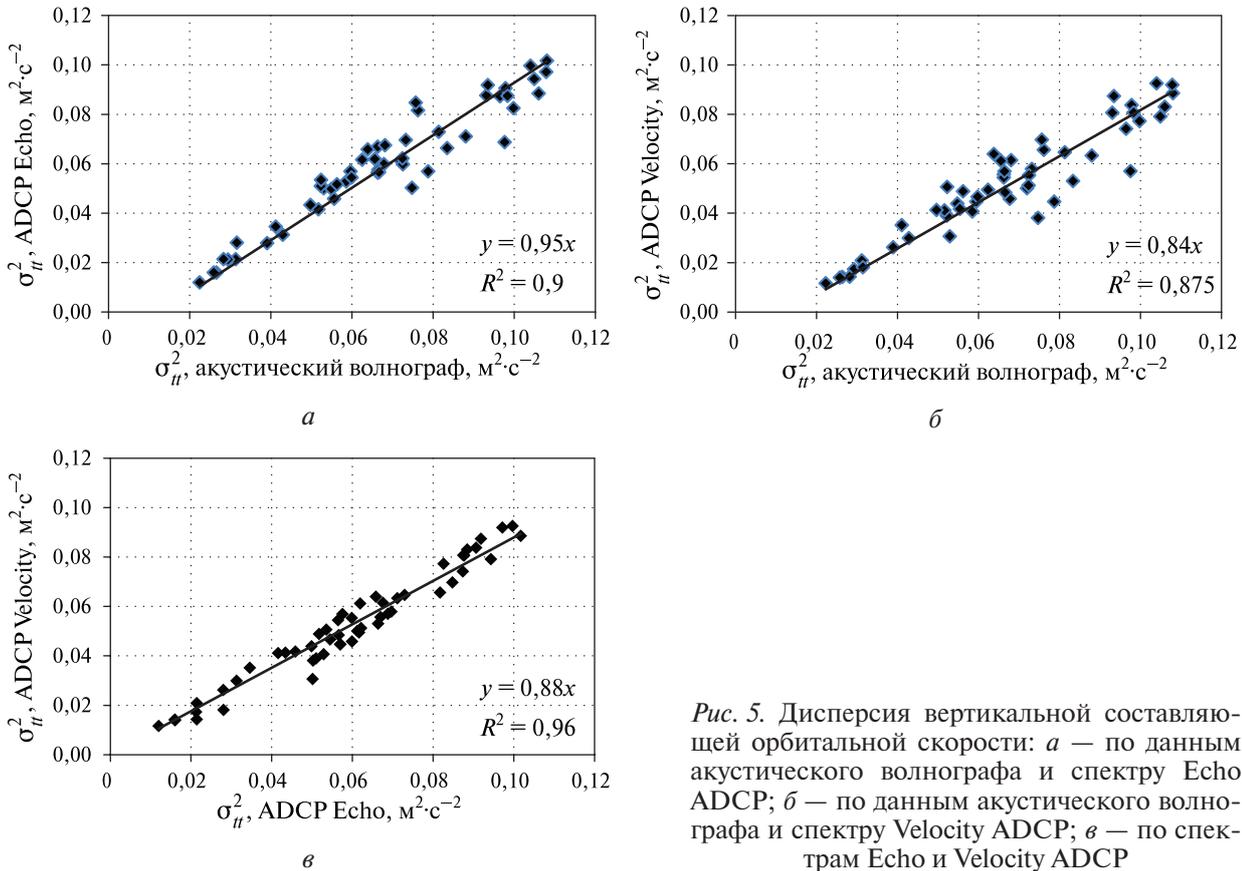
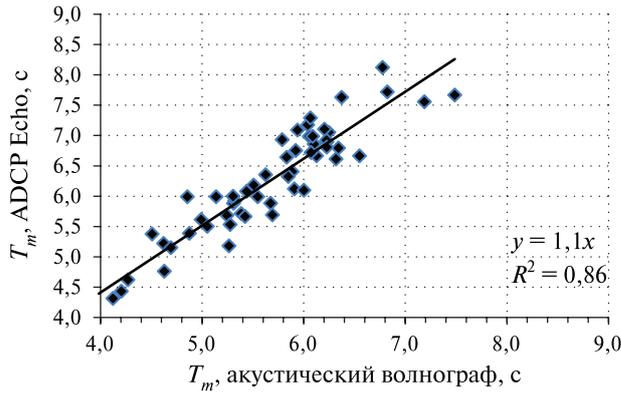


Рис. 5. Дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости: а — по данным акустического волнографа и спектру Echo ADCP; б — по данным акустического волнографа и спектру Velocity ADCP; в — по спектрам Echo и Velocity ADCP

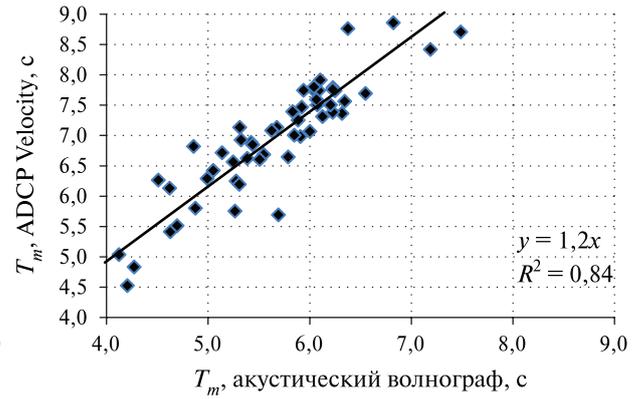
На рис. 4–7 приведены коэффициенты корреляции между измерениями акустического волнографа и ADCP, прямые линии на рисунках — линии $y = ax$. Здесь a лежит в интервале $[0,84; 1,27]$, а коэффициент корреляции не ниже 0,83. Таким образом, интегральные характеристики, вычисленные по спектру, измеренному подводным акустическим волнографом, и такие же интегральные характеристики, вычисленные по спектрам, измеренным ADCP, близки. Можно заметить, что результаты метода Echo лучше совпадают с измерениями акустического волнографа (a лежит в интервале $[0,95; 1,13]$, $R^2 \geq 0,86$) и очень близки к тому, как соотносятся между собой методы Echo и Velocity (a лежит в интервале $[0,88; 1,12]$, $R^2 \geq 0,9$). Похожие результаты были получены в работе (Birch et al., 2004), в которой приведено сравнение двух ADCP с функцией измерения волнения: RDI 1200 kHz Doppler Current Profiler, использующего array method, и Nortek 1000 kHz AWAC Doppler Profiler, использующего surface track method, сходный с принципом работы акустического волнографа. Для SWH и T_p получены схожие коэффициенты корреляции и аппроксимирующие функции.

Приведённые в таблице данные подтверждают, что подводный акустический волнограф обеспечивает измерение параметров волнения с точностью, не уступающей ADCP.

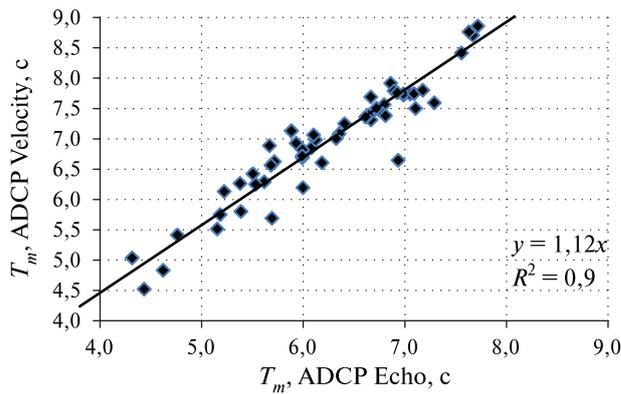
Несмотря на близость интегральных характеристик, спектры, восстанавливаемые по измерениям акустического волнографа и ADCP, различаются.



a

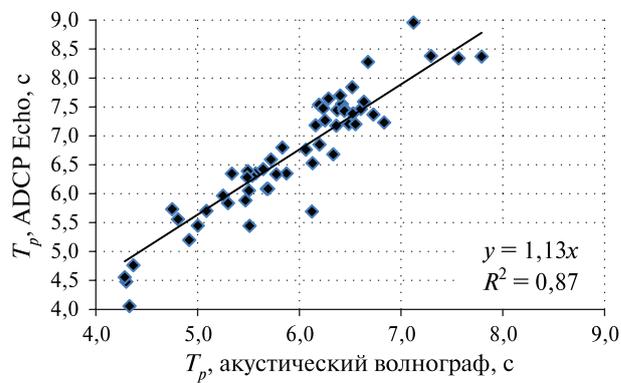


б

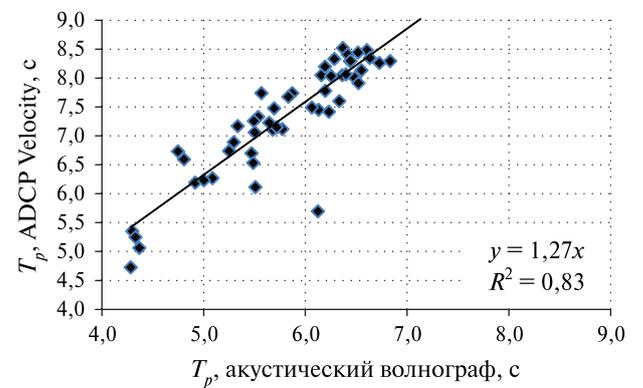


в

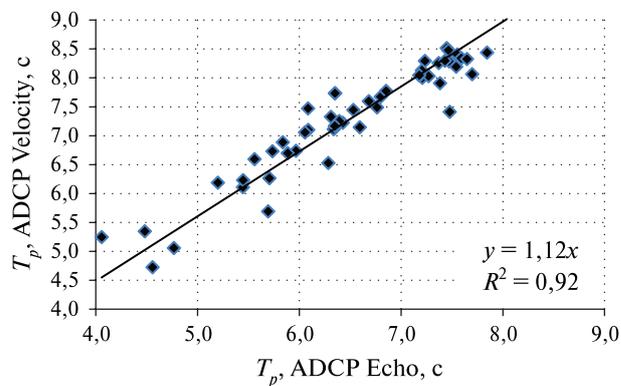
Рис. 6. Средний период волнения T_m : *a* — по данным акустического волнографа и спектру Echo ADCP; *б* — по данным акустического волнографа и спектру Velocity ADCP; *в* — по спектрам Echo и Velocity ADCP



a



б



в

Рис. 7. Значительный период волнения T_p : *a* — по данным акустического волнографа и спектру Echo ADCP; *б* — по данным акустического волнографа и спектру Velocity ADCP; *в* — по спектрам Echo и Velocity ADCP

В таблице представлены значения интегральных параметров для измерений, проведённых утром и вечером 1 февраля.

Сравнение интегральных параметров спектров волнения, полученных по данным подводного акустического волнографа и ADCP за 01.02.2020

	Время начала записи	Продолжительность записи, мин	H_s , м	σ_{η}^2 , $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$	T_m , с	T_p , с
Акустический волнограф	11:04	15	1,7	0,08	5,3	5,5
ADCP Echo	10:59	40	1,4	0,07	5,2	5,5
ADCP Velocity			1,2	0,05	5,8	6,1
Акустический волнограф	22:59	15	1,3	0,06	5,1	5,3
ADCP Echo	22:59	40	1,3	0,06	5,5	5,8
ADCP Velocity			1,2	0,05	6,4	6,9

На рис. 8 и 9 (см. с. 199) приведены спектры волнения, полученные 1 февраля 2020 г. На всех рисунках сплошная кривая — спектр, восстановленный по измерениям акустического волнографа, пунктирная — спектр Echo ADCP, штрих-пунктирная — спектр Velocity ADCP.

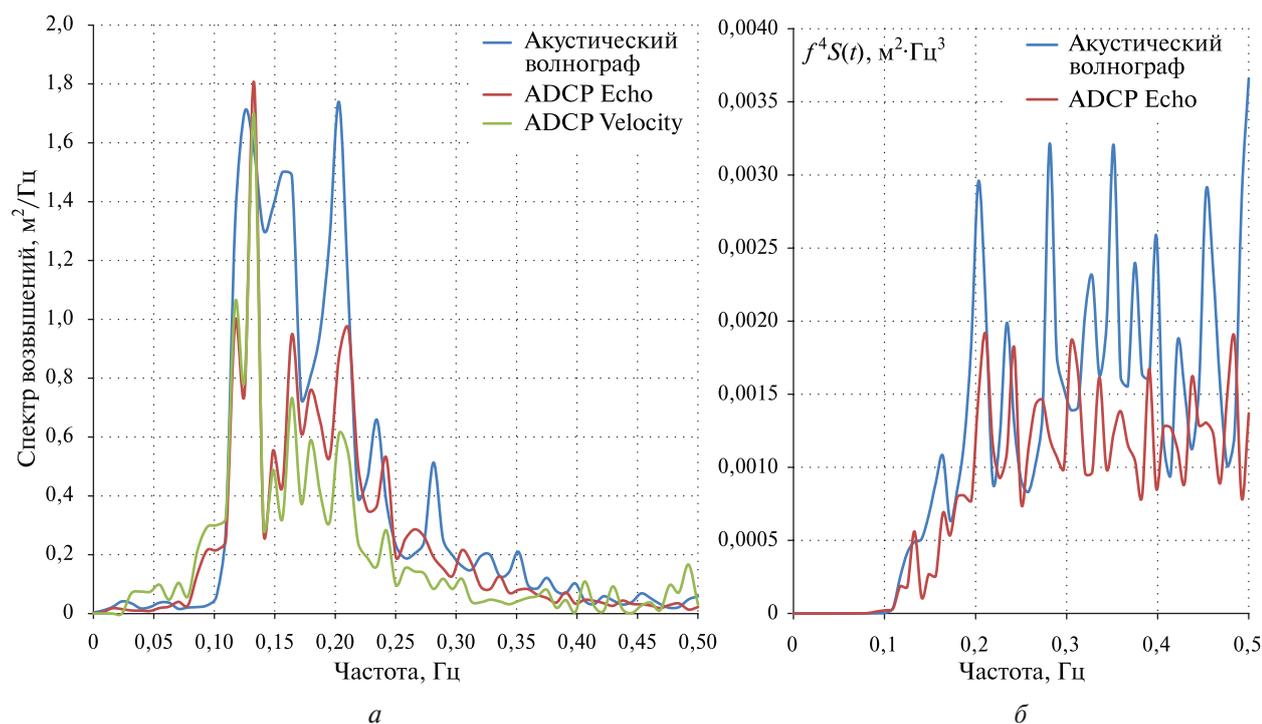


Рис. 8. Спектры по данным акустического волнографа (измерены 01.02.2020 в 11:04) и ADCP (10:59): а — спектр высот $S(f)$; б — спектр уклонов $f^4 S(f)$

Из рис. 3 видно, что спектральная плотность, полученная по данным метода Velocity ADCP (зелёная линия), резко возрастает после 0,4 Гц. Это приведёт к тому, что на графике спектров уклонов Velocity будет выходить за пределы выбранного интервала, поэтому спектр Velocity не изображён на рис. 8б и 9б. Из рисунков видно, что у спектров акустического волнографа и ADCP часто не совпадает частота первого пика (частоты около 0,1 Гц, что соответствует длине волны 134 м при дисперсионном соотношении $\omega^2 = gk \cdot \tanh(kH)$, где $H = 28$ м — глубина моря в месте установки приборов). Однако спадают спектр Echo и спектр, измеренный подводным акустическим волнографом, примерно по одному закону (частоты

0,3–0,5 Гц, т.е. длины волн — 5–18 м при том же дисперсионном соотношении). Как можно заметить, спектры, измеренные ADCP, также не совпадают, следовательно, форма спектра не может считаться «достоверной» характеристикой. Решение этого вопроса достигается сравнением со спектрами, которые измеряет струнный волнограф. Такое прямое сравнение можно провести на морской платформе, расположенной вблизи пос. Кацивели.

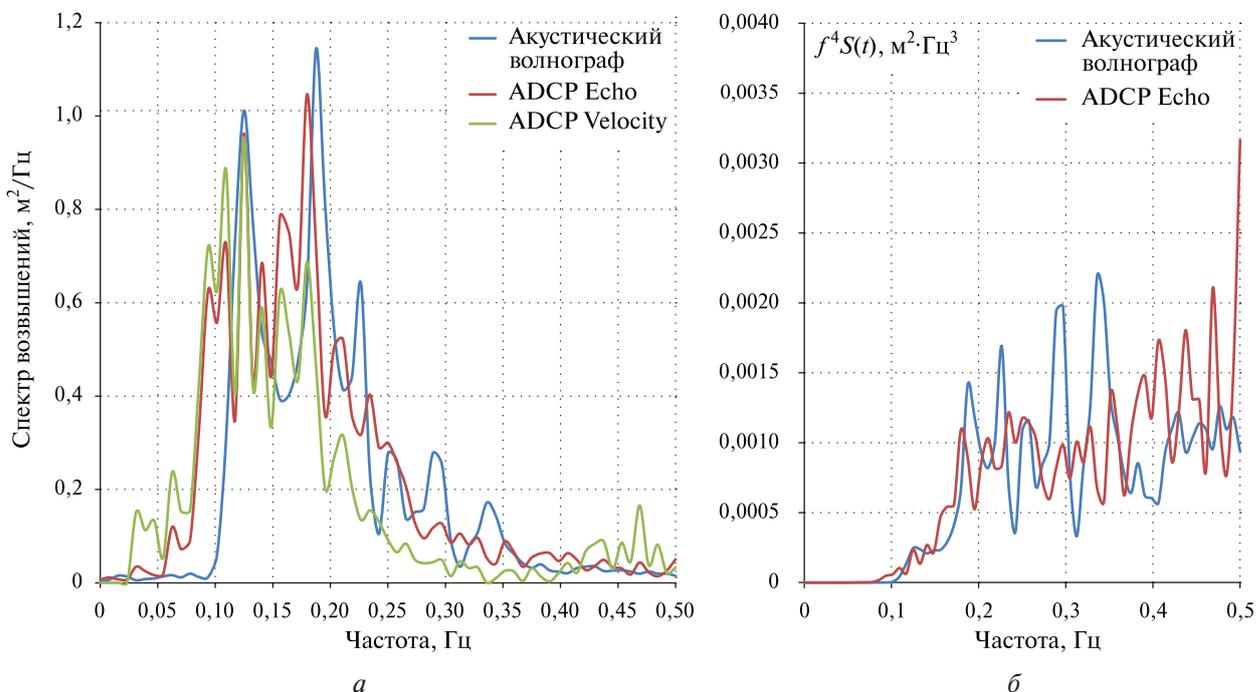


Рис. 9. Спектры по данным акустического волнографа и ADCP (измерены 01.02.2020 в 22:59): а — спектр высот $S(f)$; б — спектр уклонов $f^4S(f)$

Заключение

Подводный акустический волнограф работает на полигоне «Геленджик» ЮО ИО РАН с 2019 г. В работе проведено сравнение восстановленных ненаправленных спектров волнения крупных (длиной более 12 м) волн, измеренных акустическим волнографом и ADCP RDI WHS-600 с функцией измерения волнения, установленным на том же полигоне, а также статистических характеристик волнения, вычисленных по измеренным спектрам за 1–10 февраля 2020 г. Поскольку спектр Velocity, измеряемый ADCP, резко возрастает при частотах выше 0,35–0,4 Гц, то для вычисления статистических характеристик (высоты значительного волнения, дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости, значительного и среднего периода волнения) спектры интегрировались до 0,35 Гц. Показано, что статистические характеристики, измеренные приборами, близки. Несмотря на близость интегральных характеристик, спектры, восстанавливаемые по измерениям акустического волнографа и ADCP, различаются. У спектров часто не совпадает положение первого пика в спектре (частоты около 0,1 Гц), однако законы спада спектра Echo и спектра, измеренного акустическим волнографом, похожи (частоты 0,3–0,5 Гц). Несовпадение спектров волнения может быть связано с разными процедурами обработки, различным временем усреднения, разной несущей частотой и с различием в диаграммах направленности. Следует отметить, что два метода получения спектра в ADCP не дают совпадающего результата. Так что для проверки корректности измерений формы спектра возвышений требуется проводить дополнительные эксперименты со струнным волнографом. Такое прямое сравнение можно провести на морской платформе с закреплённым струнным волнографом.

В результате исследования была экспериментально подтверждена точность измерения статистических характеристик поверхностного волнения подводным акустическим волнографом, что говорит о возможности использования подводного акустического волнографа для валидации спутниковых измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-35-20057 мол_а_вед).

Литература

1. Баранов В. И., Куклев С. Б., Зацепин А. Г., Подымов О. И., Очередник В. В. Кабельная система берегового мониторинга состояния водной среды в режиме реального времени // Современные методы и средства океанологических исследований. 2015. Т. 1. С. 14–16.
2. Зацепин А. Г., Островский А. Г., Кременецкий В. В., Низов С. С., Пиотух В. Б., Соловьев В. А., Швоев Д. А., Цибульский А. Л., Куклев С. Б., Куклева О. Н., Москаленко Л. В., Подымов О. И., Баранов В. И., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кубряков А. А., Соловьев Д. М., Станичный С. В. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29. DOI: 10.31857/S0030157420010013.
3. Караев В. Ю., Каневский Е. М., Мешков Е. М. Измерение параметров поверхностного волнения подводными акустическими системами: обсуждение концепции прибора // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 9–10. С. 634–645.
4. Караев В. Ю., Мешков Е. М., Титченко Ю. А. Подводный акустический высотомер // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 7. С. 543–554.
5. Караев В. Ю., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Панфилова М. А., Рябкова М. С. Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью при малых углах падения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 221–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-221-234.
6. Коровин В. П. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне моря: учеб. пособие. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 434 с.
7. Титченко Ю. А., Караев В. Ю. Метод определения параметров морского волнения с помощью модифицированного акустического волнографа // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 8. С. 544–554.
8. Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation A Practical Primer. P/N 951-6069-00. Teledyne RD Instruments, 2011. 56 p. URL: <https://www.comm-tec.com/Docs/Manuali/RDI/BBPRIME.pdf>.
9. Badulin S. I. A physical model of sea wave period from altimeter data // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119. P. 856–869. DOI: 10.1002/2013JC009336.
10. Bass F. G., Fuks I. M. Scattering of Waves by Statistically Rough Surfaces. Oxford: Pergamon Press, 1979. 540 p.
11. Birch R., Fissel D. B., Borg K., Lee V., English D. The Capabilities of Doppler Current Profilers for Directional Wave Measurements in Coastal and Nearshore Waters // Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04. Kobe Japan. 2004. P. 1–10. DOI: 10.1109/OCEANS.2004.1406330.
12. Brown G. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1977. V. 25. P. 67–74.
13. Chapron B., Johnsen H., Garello R. Wave and wind retrieval from SAR images of the ocean // Annales Des Télécommunications. 2001. V. 56. P. 682–699.
14. Dally W. R., Osiecki D. A. Comparison of Deep-water ADCP and NDBC Buoy Measurements to Hindcast Parameters // Proc. Intern. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. 2004. 12 p.
15. Essenwanger O. M. Elements of statistical analysis. Amsterdam: Elsevier, 1986. 424 p.
16. Gommenginger C. P., Srokosz M. A., Challenor P. G., Cotton P. D. Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. No. 22. P. 2150. DOI: 10.1029/2003GL017743.
17. Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures. NDBC Technical Document 09-02. NDBC, 2009. 78 p. URL: <https://www.ndbc.noaa.gov/NDBCHandbookofAutomatedDataQualityControl2009.pdf>.
18. Hasselmann S., Brüning C., Hasselmann K., Heimbach P. An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra // J. Geophysical Research: Oceans. 1996. V. 101. P. 16615–16629.

19. *Hersbach H.* Comparison of C-Band Scatterometer CMOD5.N Equivalent Neutral Winds with ECMWF // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2010. V. 27. P. 721–736. DOI: 10.1175/2009JTECHO698.1.
20. *Hwang P.A., Teague W.J., Jacobs G.A., Wang D.W.* A statistical comparison of wind speed, wave height, and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1998. V. 103. P. 10451–10468.
21. *Karaev V.Y., Panfilova M.A., Jie G.* Influence of the type of sea waves on the backscattered radar cross section at medium incidence angles // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. P. 904–910. DOI: 10.1134/S0001433816090139.
22. *Lemaire D., Sobieski P., Guissard A.* Full-range sea surface spectrum in nonfully developed state for scattering calculations // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1999. V. 37. P. 1038–1051.
23. *Mouche A., Chapron B.* Global C-Band Envisat, RADARSAT-2 and Sentinel-1 SAR measurements in co-polarization and cross-polarization // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2015. V. 120. P. 7195–7207. DOI: 10.1002/2015JC011149.
24. *Quilfen Y., Chapron B., Collard F., Serre M.* Calibration/Validation of an Altimeter Wave Period Model and Application to TOPEX/Poseidon and Jason-1 Altimeters // *Marine Geodesy*. 2004. V. 27. P. 535–549. DOI: 10.1080/01490410490902025.
25. *Romeiser R., Graber H.C., Caruso M.J., Jensen R.E., Walker D.T., Cox A.T.* A New Approach to Ocean Wave Parameter Estimates From C-Band ScanSAR Images // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. P. 1320–1345. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2337663.
26. *Ryabkova M., Titchenko Y., Meshkov E., Panfilova M., Karaev V.* Simultaneous Doppler Spectra Measurements of the Backscattered Signal at Low Incidence Angles Using Microwave Radars and an Ultrasonic Underwater Wave Gauge // *Proc. OCEANS 2019*. 17–20 June 2019, Marseille, France. 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867240.
27. *Schulz-Stellenfleh J., König T., Lehner S.* An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2007. V. 112. C03019. DOI: 10.1029/2006JC003970.
28. *Stoffelen A., Anderson D.* Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4 // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1997. V. 102. P. 5767–5780.
29. *Strong B., Brumley B., Terray E., Stone G.* The performance of ADCP-derived directional wave spectra and comparison with other independent measurements // *Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. and Exhibition*. 11–14 Sept. 2000, Providence, RI, USA. 2000. P. 1195–1203. DOI: 10.1109/OCEANS.2000.881763.
30. *Terray E., Brumley B., Strong B.* Measuring waves and currents with an upward-looking ADCP // *Oceanology International'98*. 1998. V. 2. P. 261–269.
31. *Titchenko Y.A., Karaev V.Y., Meshkov E.M., Zuikova E.M.* Measuring the Variance of the Vertical Orbital Velocity Component by an Acoustic Wave Gauge with a Single Transceiver Antenna // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. No. 8. P. 4340–4347. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2396120.
32. *Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M., Kuznetsova A., Meshkov E.* (2019a) Peculiarities of the Acoustic Pulse Formation Reflected by the Water Surface: a Numerical Experiments and the Results of Long-term Measurements Using the “Kalmar” Sonar // *Proc. OCEANS 2019*. 17–20 June 2019, Marseille, France. 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867467.
33. *Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M., Meshkov E.* (2019b) Measurements of the Sea Surface Parameters Using a New Modification of Underwater Sonar on a Marine Platform in the Black Sea // *Proc. OCEANS 2019*. 17–20 June 2019, Marseille, France. 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867195.
34. *Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Meshkov E., Yablokov A.* (2019c) Experimental study of the possibility of using an underwater acoustic wave gauge in freezing waters to measure the thickness of the ice cover // *Proc. OCEANS 2019*. 17–20 June 2019, Marseille, France. 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867337.
35. *Valenzuela G.* Theories for interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review // *Boundary Layer Meteorology*. 1978. V. 13. P. 61–86.
36. *Wang J., Aouf L., Jia Y., Zhang Y.* Validation and Calibration of Significant Wave Height and Wind Speed Retrievals from HY2B Altimeter Based on Deep Learning // *Remote Sensing*. 2020. V. 12(17). Art. No. 2858. 12 p. DOI: 10.3390/rs12172858.
37. *Wang H., Wang J., Yang J., Ren L., Zhu J., Yuan X., Xie C.* Empirical Algorithm for Significant Wave Height Retrieval from Wave Mode Data Provided by the Chinese Satellite Gaofen-3 // *Remote Sensing*. 2018. V. 10(3). Art. No. 363. 23 p. DOI: 10.3390/rs10030363.
38. *Waves User's Guide*. P/N 957-6148-00. Teledyne RD Instruments, 2001. 74 p. URL: <https://www.commtec.com/Prods/mfgs/RDI/Software/Manuals/Waves-Manual/Waves%20Users%20Guide.pdf>.
39. *Welch P.* The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Trans. Audio and Electroacoustics*. 1967. V. 15. No. 2. P. 70–73. DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901.

40. Yang J., Zhang J. Validation of Sentinel-3A/3B Satellite Altimetry Wave Heights with Buoy and Jason-3 Data // Sensors. 2019. V. 19(13). Art. No. 2914. 14 p. DOI: 10.3390/s19132914.
41. Zhang B., Li X., Perrie W., He Y. Synergistic measurements of ocean winds and waves from SAR // J. Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 120. P. 6164–6184. DOI: 10.1002/2015JC011052.

Measurement of statistical characteristics of the sea surface using an underwater acoustic wave gauge in the Black Sea and comparison with ADCP

M. S. Ryabkova¹, Yu. A. Titchenko¹, V. Yu. Karaev¹, E. M. Meshkov²,
R. V. Belyaev¹, A. A. Yablokov¹, V. I. Baranov², V. V. Ocherednik²

¹ Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: mrjabkova@gmail.com

² Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mails: baranovvlad@mail.ru, v.ocherednik@ocean.ru

The article introduces a comparison of the statistical characteristics of surface waves measured by an acoustic wave gauge and Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) during long-term monitoring of the sea surface at the Gelendzhik test site in the Black sea. The acoustic wave gauge was installed at the Gelendzhik test site in 2019. On the test site, there is also an RDI WHS-600 ADCP device with a pressure sensor installed under water, oriented upwards. The devices operate in the ultrasonic frequency range, but use different measurement schemes: the acoustic wave gauge determines the distance to the surface by the arrival time of the reflected signal of the vertical channel; ADCP uses the reflection of the signal of four inclined emitters (Echo), as well as measurements of the velocity spectrum (Velocity). The acoustic wave gauge measures the non-directional wave spectrum. ADCP allows user to determine both the directional wave spectrum and the non-directional one. The measured wave spectrum can be used to calculate the parameters of large-scale waves (up to 12 m). The article compares both the wave spectra themselves and the integral characteristics calculated from them: the significant wave height, the dispersion of the vertical component of the orbital velocity, and the significant and average wave periods for February 1–10, 2020. It is shown that the statistical characteristics measured by the two devices are similar and the difference between the measurements of the acoustic wave gauge and the results of two different ADCP data processing algorithms (Echo and Velocity) does not differ more than the results of the two algorithms differ from each other. The spectra measured by the two instruments differ in the peak region, and fall off in the same way. However, the spectra recovered by different methods from ADCP measurements also differ, which suggests that the shape of the recovered spectrum depends significantly on the processing algorithm. In the future, it is planned to consider this issue in more detail and compare the measurements of an acoustic wave gauge with those of a string wave gauge.

Ключевые слова: sea surface, acoustic wave gauge, ADCP, significant wave height, wave spectrum, wind waves, dispersion of the vertical component of orbital velocity, significant wave periods, average wave periods

Accepted: 30.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-189-204

References

1. Baranov V. I., Kuklev S. B., Zatsepin A. G., Podymov O. I., Ocherednik V. V., Cable system for onshore monitoring of the state of the aquatic environment in real time, *Sovremennyye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy*, 2015, Vol. 1, pp. 14–16 (in Russian).
2. Zatsepin A. G., Ostrovskii A. G., Kremenetskiy V. V., Nizov S. S., Piotukh V. B., Soloviev V. A., Shvoev D. A., Tsibul'sky A. L., Kuklev S. B., Kukleva O. N., Moskalenko L. V., Podymov O. I., Baranov V. I., Kondra-

- shov A. A., Korzh A. O., Kubryakov A. A., Soloviev D. M., Stanichny S. V., Subsatellite polygon for studying hydrophysical processes in the black sea shelf-slope zone, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 13–25, DOI: 10.31857/S0030157420010013.
3. Karaev V. Yu., Kanevskiy M. B., Meshkov E. M., Measurement of sea wave parameters by underwater acoustic systems: discussions on the device concept, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2010, Vol. 53, No. 9–10, pp. 634–645.
 4. Karaev V. Yu., Meshkov E. M., Titchenko Yu. A., Underwater acoustic altimeter, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, Vol. 57, No. 7, pp. 543–554.
 5. Karaev V. Yu., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Panfilova M. A., Ryabkova M. S., Doppler spectrum of microwave signal backscattered by sea surface at small incidence angles, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 221–234 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-221-234.
 6. Korovin V. P., *Okeanologicheskie nablyudeniya v pribrezhnoi zone morya* (Oceanographic observations in the coastal zone), Saint Petersburg: RSHU Publishers, 2007, 434 p. (in Russian).
 7. Titchenko Yu. A., Karaev V. Yu., Method for determining the parameters of sea waves using a modified acoustic wave recorder, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2012, Vol. 55, No. 8, pp. 544–554.
 8. *Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation A Practical Primer*, P/N 951-6069-00, Teledyne RD Instruments, 2011, 56 p., available at: <https://www.comm-tec.com/Docs/Manuali/RDI/BBPRIME.pdf>.
 9. Badulin S. I., A physical model of sea wave period from altimeter data, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol. 119, pp. 856–869, DOI: 10.1002/2013JC009336.
 10. Bass F. G., Fuks I. M., *Scattering of Waves by Statistically Rough Surfaces*, Oxford: Pergamon Press, 1979, 540 p.
 11. Birch R., Fissel D. B., Borg K., Lee V., English D., The Capabilities of Doppler Current Profilers for Directional Wave Measurements in Coastal and Nearshore Waters, *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04*, Kobe Japan, 2004, pp. 1–10, DOI: 10.1109/OCEANS.2004.1406330.
 12. Brown G., The average impulse response of a rough surface and its applications, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1977, Vol. 25, pp. 67–74.
 13. Chapron B., Johnsen H., Garello R., Wave and wind retrieval from SAR images of the ocean, *Annales Des Télécommunications*, 2001, Vol. 56, pp. 682–699.
 14. Dally W. R., Osiecki D. A., Comparison of Deep-water ADCP and NDBC Buoy Measurements to Hindcast Parameters, *Proc. Intern. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, 2004, 12 p.
 15. Essenwanger O. M., *Elements of statistical analysis*, Amsterdam: Elsevier, 1986, 424 p.
 16. Gommenginger C. P., Srokosz M. A., Challenor P. G., Cotton P. D., Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model, *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, No. 22, p. 2150, DOI: 10.1029/2003GL017743.
 17. *Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures*, NDBC Technical Document 09-02, NDBC, 2009, 78 p., available at: <https://www.ndbc.noaa.gov/NDBCHandbookofAutomatedDataQualityControl2009.pdf>.
 18. Hasselmann S., Brüning C., Hasselmann K., Heimbach P., An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1996, Vol. 101, pp. 16615–16629.
 19. Hersbach H., Comparison of C-Band Scatterometer CMOD5.N Equivalent Neutral Winds with ECMWF, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, Vol. 27, pp. 721–736, DOI: 10.1175/2009JTECHO698.1.
 20. Hwang P. A., Teague W. J., Jacobs G. A., Wang D. W., A statistical comparison of wind speed, wave height, and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1998, Vol. 103, pp. 10451–10468.
 21. Karaev V. Y., Panfilova M. A., Jie G., Influence of the type of sea waves on the backscattered radar cross section at medium incidence angles, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, pp. 904–910, DOI: 10.1134/S0001433816090139.
 22. Lemaire D., Sobieski P., Guissard A., Full-range sea surface spectrum in nonfully developed state for scattering calculations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1999, Vol. 37, pp. 1038–1051.
 23. Mouche A., Chapron B., Global C-Band Envisat, RADARSAT-2 and Sentinel-1 SAR measurements in copolarization and cross-polarization, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, pp. 7195–7207, DOI: 10.1002/2015JC011149.
 24. Quilfen Y., Chapron B., Collard F., Serre M., Calibration/Validation of an Altimeter Wave Period Model and Application to TOPEX/Poseidon and Jason-1 Altimeters, *Marine Geodesy*, 2004, Vol. 27, pp. 535–549, DOI: 10.1080/01490410490902025.
 25. Romeiser R., Graber H. C., Caruso M. J., Jensen R. E., Walker D. T., Cox A. T., A New Approach to Ocean Wave Parameter Estimates From C-Band ScanSAR Images, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, pp. 1320–1345, DOI: 10.1109/TGRS.2014.2337663.

26. Ryabkova M., Titchenko Y., Meshkov E., Panfilova M., Karaev V., Simultaneous Doppler Spectra Measurements of the Backscattered Signal at Low Incidence Angles Using Microwave Radars and an Ultrasonic Underwater Wave Gauge, *Proc. OCEANS 2019*, 17–20 June 2019, Marseille, France, 2019, pp. 1–4, DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867240.
27. Schulz-Stellenfleth J., König T., Lehner S., An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data, *J. Research: Oceans*, 2007, Vol. 112, C03019, DOI: 10.1029/2006JC003970.
28. Stoffelen A., Anderson D., Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1997, Vol. 102, pp. 5767–5780.
29. Strong B., Brumley B., Terray E., Stone G., The performance of ADCP-derived directional wave spectra and comparison with other independent measurements, *Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. and Exhibition*, 11–14 Sept. 2000, Providence, RI, USA, 2000, pp. 1195–1203, DOI: 13.1109/OCEANS.2000.881763.
30. Terray E., Brumley B., Strong B., Measuring waves and currents with an upward-looking ADCP, *Oceanology International'98*, 1998, Vol. 2, pp. 261–269.
31. Titchenko Y.A., Karaev V.Y., Meshkov E.M., Zuikova E.M., Measuring the Variance of the Vertical Orbital Velocity Component by an Acoustic Wave Gauge With a Single Transceiver Antenna, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 8, pp. 4340–4347, DOI: 10.1109/TGRS.2015.2396120.
32. Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M., Kuznetsova A., Meshkov E. (2019a), Peculiarities of the Acoustic Pulse Formation Reflected by the Water Surface: a Numerical Experiments and the Results of Long-term Measurements Using the “Kalmar” Sonar, *Proc. OCEANS 2019*, 17–20 June 2019, Marseille, France, 2019, pp. 1–7, DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867467.
33. Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M., Meshkov E. (2019b), Measurements of the Sea Surface Parameters Using a New Modification of Underwater Sonar on a Marine Platform in the Black Sea, *Proc. OCEANS 2019*, 17–20 June 2019, Marseille, France, 2019, pp. 1–7, DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867195.
34. Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M., Panfilova M., Meshkov E., Yablokov A. (2019c), Experimental study of the possibility of using an underwater acoustic wave gauge in freezing waters to measure the thickness of the ice cover, *Proc. OCEANS 2019*, 17–20 June 2019, Marseille, France, 2019, pp. 1–7, DPO: 10.1109/OCEANSE.2019.8867337.
35. Valenzuela G., Theories for interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review, *Boundary Layer Meteorology*, 1978, Vol. 13, pp. 61–86.
36. Wang J., Aouf L., Jia Y., Zhang Y., Validation and Calibration of Significant Wave Height and Wind Speed Retrievals from HY2B Altimeter Based on Deep Learning, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(17), Art. No. 2858, 12 p., DOI: 10.3390/rs12172858.
37. Wang H., Wang J., Yang J., Ren L., Zhu J., Yuan X., Xie C., Empirical Algorithm for Significant Wave Height Retrieval from Wave Mode Data Provided by the Chinese Satellite Gaofen-3, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(3), Art. No. 363, 23 p., DOI: 10.3390/rs10030363.
38. *Waves User's Guide*, P/N 957-6148-00, Teledyne RD Instruments, 2001, 74 p., available at: <https://www.comm-tec.com/Prods/mfgs/RDI/Software/Manuals/Waves-Manual/Waves%20Users%20Guide.pdf>.
39. Welch P., The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Trans. Audio and Electroacoustics*, 1967, Vol. 15, No. 2, pp. 70–73, DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901.
40. Yang J., Zhang J., Validation of Sentinel-3A/3B Satellite Altimetry Wave Heights with Buoy and Jason-3 Data, *Sensors*, 2019, Vol. 19(13), Art. No. 2914, 14 p., DOI: 10.3390/s19132914.
41. Zhang B., Li X., Perrie W., He Y., Synergistic measurements of ocean winds and waves from SAR, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, pp. 6164–6184, DOI: 10.1002/2015JC011052.