

РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСОМ ПРИБОРОВ БУЯ WAVESCAN НА ЮГО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО В 2016 г.

**Лобанов В.Б., Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И., Сергеев А.Ф., Кустова Е.В.,
Марьина Е.Н., Старжинский С.С., Харламов П.О., Шкорба С.П.,
Воронин А.А., Горин И.И., Зверев С.А., Калинин В.В., Косьяненко А.А.,
Крайников Г.А., Рудых Я.Н., Семкин П.Ю., Суховеев Е.Н., Щербинин П.Е.**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43, e-mail: pvi711@yandex.ru
Статья поступила в редакцию 20.08.2020, одобрена к печати 26.11.2020.*

Впервые выполнены длительные измерения метеорологических и гидрологических характеристик с помощью заякоренного автономного комплекса буй WaveScan на юго-западном шельфе залива Петра Великого (Японское море) с 21 апреля по 23 декабря 2016 г. Якорь буй установлен на глубине 50 м. В течение 10 мин каждого часа измерялись метеорологические характеристики приповерхностного слоя атмосферы, температура морской воды на горизонте 1.5 м и вертикальные профили вектора скорости течения с разрешением 4 м от приповерхностного слоя до придонного. В течение 20 мин каждого часа измерялись характеристики волн на поверхности моря. В целом, большинство измеренных на буйе метеорологических характеристик хорошо согласуются с данными реанализов NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), ERA-Interim и ERA5. Высота значительных волн, средний период волн и среднее спектральное направление распространения волн для всего частотного диапазона волнения по данным буй WaveScan имеют наилучшие статистические связи, доверительная вероятность которых составляет 99%, с соответствующими характеристиками волн из реанализа ERA5. Определены особенности изменчивости вертикальных профилей вектора скорости течения на синоптическом и сезонном масштабах, зависящие от скорости ветра и вертикальной стратификации плотности. В теплый сезон, ниже приповерхностного слоя трения в пикноклине наблюдается значительный левый поворот вектора измеренной скорости течения с глубиной. При скорости ветра, не превышающей 5 м/с, угол поворота вектора скорости течения достигает 170° в придонном слое, где формируется противотечение. Во время прохождения тропического циклона Лайонрок и увеличении средней суточной скорости ветра до 9 м/с угол левого поворота вектора скорости течения в пикноклине уменьшился до 20°. В холодный сезон в верхнем пограничном слое моря наблюдается классический правый поворот вектора скорости течения с глубиной, а средний по вертикали вектор скорости в 50-метровом слое, как и полный поток дрейфового течения в слое трения по Экману, отклоняются на 90° вправо от вектора скорости приповерхностного ветра. Левый поворот вектора скорости течения в точке установки буй в холодный сезон не наблюдался.

Ключевые слова: юго-западный шельф залива Петра Великого, Японское море, WaveScan buoy, измерения, изменчивость, ветровые волны, зыбь, вертикальный профиль скорости течения, метеорологические характеристики, сопоставление, реанализ ERA-Interim и ERA5

Введение

Настоящая работа посвящена первому натурному эксперименту, проводимому Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева (ТОИ) ДВО РАН с использованием заякоренного автономного комплекса WaveScan (производство фирмы Fugro OCEANOR AS, Норвегия) с 21 апреля по 23 декабря 2016 г. Измерения гидрометеорологических характеристик комплексом приборов WaveScan проводились на юго-западный шельфе залива Петра Великого в точке с глубиной 50 м, расположенной южнее залива Посыета и острова Фуругельма. Место постановки располагалось в пределах Дальневосточного морского биосферного заповедника вблизи Морской экспериментальной станции (МЭС) ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца», что обеспечивало охрану буя и возможность проведения профилактических работ. Измерения гидрометеорологических характеристик комплексом приборов буя WaveScan осуществлялись в 2016 и 2018 гг. Этот натурный эксперимент являлся частью системы мониторинга процессов в атмосфере и море наряду с длительными видео наблюдениями процессов на поверхности и в придонном слое моря в районе МЭС ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца», а также с эпизодическими судовыми наблюдениями гидрологических и гидрохимических характеристик на шельфе залива Петра Великого, в том числе в эстуариях рек. В холодный период года ежегодно проводятся измерения вертикальных профилей температуры, солёности, хлорофилла «А» под ледяным покровом мелководной части Амурского залива (Лазарюк и др., 2013), а также измерения толщины ледяного покрова и вертикальных профилей солёности кернов льда (Мельниченко и др., 2019).

В Морском гидрофизическом институте (МГИ) РАН в Севастополе реализована наиболее совершенная в России система мониторинга Черного моря (Korotaev et al., 2011; Лебедев, Кравченко, 2019), где используются многие современные методы оперативной океанологии, включая спутниковый мониторинг, регулярные автоматизированные расчеты характеристик волн на поверхности моря и полей скорости течения с помощью численных гидродинамических моделей. Выполняются регулярные судовые гидрологические съемки в различных районах Черного моря, а также измерения скорости течения на заякоренных буйковых станциях, на разрезах и полигонах (Морозов и др., 2017), которые сопровождаются СТД измерениями. ИО РАН им. П.П. Ширшова и МГИ РАН на протяжении многих лет проводят совместные исследования динамических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря на подспутниковом гидрофизическом полигоне в районе Геленджика (Зацепин и др., 2014).

Системы многоканальных спутниковых наблюдений и мониторинга приводного ветра, ветровых волн и течений в океане (Dohan, Maximenko, 2010; Villas Bôas et al., 2019), наблюдения с помощью дрейфующих буйев Argo (<https://www.argos-system.org/>) и дрейфтеров, численные гидродинамические модели циркуляции атмосферы и океана позволяют совершенствовать методы диагноза и прогноза метеорологических условий, ветровых волн и течений в океане, увеличивать разре-

шение и точность метеорологических и океанографических реанализов. Согласно современным представлениям, ветер, течения и волны являются связанными переменными и требуют комплексных наблюдений и моделирования (Villas Bôas et al., 2019).

Гидрологические условия на шельфе залива Петра Великого, в том числе вертикальная структура вод, система течений, их сезонная и синоптическая изменчивость исследовались на протяжении десятков лет по данным измерений (Супранович, Якунин, 1976; Винокурова, 1977; Винокурова, Скокленёв, 1980; Григорьева и др., 1993; Григорьева, Кучерявенко, 1995, 2002). Измерения температуры и солености гидрологическими зондами и скорости течения приборами БПВ1 и БПВ2 выполнялись в юго-западной части залива Петра Великого с конца 70-х до начала 90-х гг. прошлого века (Григорьева и др., 1993; Григорьева, Кучерявенко, 1995, 2002). В этих работах отмечается, что глубина залегания слоя скачка плотности в юго-западной части залива Петра Великого в июне–июле изменяется от 5 до 15 м в зависимости от скорости ветра (Григорьева, Кучерявенко, 2002). При анализе данных измерений скорости течения приборами БПВ1 и БПВ2 в заливе Посыета в летний сезон (Григорьева и др., 1993) на отдельных станциях в придонном слое шельфа наблюдалось противотечение по отношению к направлению течения в верхнем слое, что в публикациях не детализировалось и не обсуждалось.

В 2004–2007 гг. сотрудниками ТОИ ДВО РАН выполнены измерения скорости течения и температуры воды в различных районах залива Петра Великого продолжительностью от 11 до 190 суток на 12 автономных буйковых станциях цифровыми интегрирующими измерителями «Поток» (Храпченков и др., 2008). Измерения проводились в районах шельфа с глубиной моря от 16 до 62 м. На юго-западном шельфе залива, в том числе у мыса Гамов, измерения проводились только одним измерителем «Поток» в придонном слое. В остальных районах залива измерения проводились двумя приборами в приповерхностном и придонном слоях. В этой статье показаны приливные колебания, синоптическая и сезонная изменчивости модуля и направления скорости течения на конкретных горизонтах в верхнем и придонном слоях моря, приведены розы векторов скорости течения на этих горизонтах на многих буйковых станциях в различные месяцы и сезоны года. Разномасштабная временная изменчивость измеренных векторов скорости течения связана с различными динамическими процессами в атмосфере и море.

Синоптическая и сезонная изменчивости струйных течений, мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей в заливе Петра Великого, связанные с изменением поля скорости ветра и вертикальной стратификации плотности в морской толще, исследовались в ТОИ ДВО РАН как с использованием многоканальной спутниковой информации различного пространственного разрешения (Дубина, Катин, 2018; Ладыченко, Лобанов, 2013), так и методами гидродинамического моделирования разномасштабной циркуляции (Пономарев и др., 2013; Дубина и др., 2013; Пранц и др., 2013; Fauman et al., 2019), в том числе с использованием спутниковых наблюдений для верификации численных экспериментов.

Заякоренные гидрометеорологические буи (Rapizo et al., 2015; Petersen, 2017) являются надежным источником получения долговременных рядов данных наблюдений в конкретных точках. Производятся измерения скорости приводного ветра, течений в различных слоях моря, составляющих теплового баланса и характеристик волн на поверхности моря с высоким разрешением по времени. Проверенные данные измерений на этих буях используются при планировании бурения скважин для добычи нефти и газа, в оперативной океанографии и метеорологии, в спутниковой океанографии, а также для верификации результатов численных экспериментов с гидродинамическими моделями циркуляции и волн на поверхности моря.

Основная цель настоящей работы – сопоставление временных рядов метеорологических характеристик в приводном слое, температуры морской воды, параметров волн на поверхности моря, рассчитанных процессором буя WaveScan по данным измерений с соответствующими временными рядами моделей глобального реанализа и данных наблюдений на ближайшей к бую метеорологической станции Посьет. Одной из задач работы является оценка зависящих от скорости ветра особенностей изменчивости вертикальных профилей вектора скорости течения на синоптическом и сезонном масштабах.

Оборудование и методы измерений комплекса WaveScan

Автономный заякоренный измерительный комплекс WaveScan был установлен в морской экспедиции ТОИ ДВО РАН в точке с координатами: $42^{\circ} 25.5'$ с.ш., $130^{\circ} 57.07'$ в.д. и глубиной 50 м в 5 км южнее о. Фуругельма (рис. 1а). Буй WaveScan имеет корпус дискообразной формы (рис. 1б) диаметром 2.8 м, который при общей массе около 870 кг обеспечивает плавучесть до 2500 кг.

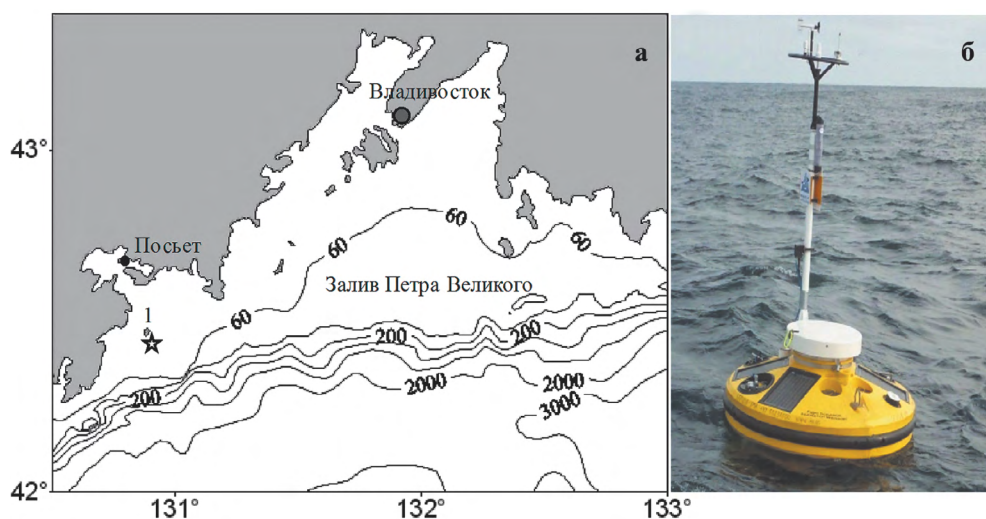


Рис. 1. Рельеф дна залива Петра Великого и место установки измерительного комплекса WaveScan, показанное звездочкой южнее небольшого острова Фуругельма, который обозначен цифрой «1» на рис. а. Фотография надводной части буя WaveScan с метеорологической мачтой и солнечными батареями на рис. б.

Для предотвращения опрокидывания буя ниже ватерлинии (под корпусом) установлен киль с противовесом (200 кг). В состав буя входит мачта высотой около 4 м с установленными на ней метеорологическими датчиками, антеннами и сигнальным оборудованием. Метеорологические и гидрологические измерения выполнялись комплексом приборов WaveScan с дискретностью один час с 21 апреля 2016 г. по 23 декабря 2016 г., за исключением периода регламентных профилактических работ 21–28 июня. Данные наблюдений оперативно передавались комплексом по сотовой телефонной сети на сервер ТОИ ДВО РАН, а также фиксировались в памяти бортового компьютера. Автономность работы буя обеспечивали солнечные батареи, расположенные на его поверхности, аккумуляторы и система управления питанием. Измерительный комплекс буя WaveScan включал следующее оборудование, метрологические характеристики которого приведены в таблице 1:

- Wavesense 3 (производитель Fugro OCEANOR) – акселерометрический датчик волн и регистратор данных;
- РТВ 330 (Vaisala, Финляндия) – барометр (давление воздуха);
- НМР 155 (Vaisala) – термометр/гигрометр (температура/влажность воздуха);
- WindSonic (Gill Instruments Ltd., Великобритания) – акустический анемометр (скорость и направление ветра);

Таблица 1. Основные метрологические характеристики приборов буя WaveScan

| Прибор | | Диапазон | Точность | Разрешение |
|-----------------------------|---|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| Метеорологические параметры | | | | |
| РТВ 330 | Атмосферное давление | 500–1100 гПа | ±0.6 гПа | 0.01 гПа |
| НМР 155 | Температура воздуха | –80 – + 60°C | ±0.5 °C | |
| | Влажность воздуха | 0–100% | ±2% | |
| WindSonic | Скорость ветра Модуль скорости | 0–60 м/с | ±2% при 12 м/с | 0.01 м/с |
| | Направление скорости | 0–359° | ±3° при 12 м/с | 1° |
| SMP11 | Поток коротковолновой солнечной радиации | 10–4000 Вт/м ² | до ±20 Вт/м ² | 12 Вт/м ² |
| Гидрологические параметры | | | | |
| Aquadopp | Скорость течения Модуль скорости | 0–10 м/с | ±0.5 см/с | |
| | Направление скорости | 0–359° | 2° | 0.1° |
| | Температура воды на глубине 1.5 м | –4 – + 30 °C | 0.1 °C | 0.01°C |
| ECO Triplet | CDOM | 0–370 ppb | | 0.12 ppb |
| C-star | Прозрачность | 0–100% | до ±2% | |
| Wavesense 3 | Волны Высота | 0–20 м | ±0.05 м | |
| | Направление | 0–359° | 1° | |
| | Период | 1–30 сек | ±0.15 сек | |

- SMP11 (Kipp & Zonen, Нидерланды) – пиранометр (измеритель интенсивности падающего потока коротковолновой солнечной радиации на ровную поверхность (обзор 180°) в диапазоне длин волн от 0.3 до 3 микрометров);
- Aquadopp 400 кГц (Nortek, Норвегия) – акустический профилограф скорости течения (доплеровский измеритель модуля скорости и направления течения);
- C-star (WET Labs, США) – трансмиссиометр (прозрачномер с базой 25 см);
- ECO Triplet (WET Labs, США) – трехканальный анализатор содержания в морской воде групп химических соединений при соответствующих длинах волн светодиода/фотодиода: Phycocyanin – 630/680 нм, Phycoerythrin – 540/570 нм и CDOM (Color Dissolved Organic Matter) – 370/460 нм.

Датчик атмосферного давления РТВ 330 находился внутри корпуса буя (у основания мачты). Другие метеорологические измерительные приборы комплекса расположены на мачте буя на высоте 3.5 м. Гидрологические приборы C-star и ECO Triplet (таблица 1) установлены в специальных колодцах корпуса буя. Измерения прозрачности морской воды (C-star) и содержания отмеченных выше групп химических соединений (ECO Triplet) осуществлялись в подповерхностном слое 0.5–0.7 м, но из-за обрастания водорослями результаты этих измерений недостоверны и в данной работе не рассматривались.

С помощью акустического профилографа Aquadopp, закрепленного в раме под килем буя, измерялись направление и модуль скорости течения послойно с шагом по глубине 4 м, а его термометр регистрировал температуру воды на горизонте 1.5 м с инерционностью 10 мин. Высота, период и направление распространения волн определялись регистратором Wavesense 3 на основе показаний акселерометров и последующего спектрального анализа, выполняемого бортовым компьютером. Бортовой компьютер, расположенный в изолированном, герметичном боксе, осуществлял в автоматическом режиме управление приборами измерительного комплекса, обработку поступающей информации с последующей фиксацией усредненных величин измеренных характеристик и рассчитанных величин в собственной памяти. Передача данных на сервер ТОИ ДВО РАН осуществлялась ежедневно по каналам сотовой телефонной связи.

Приборы комплекса большую часть времени находились в режиме ожидания и переводились компьютером в активное состояние в конце каждого часа в соответствии с установленным регламентом. Метеорологические приборы РТВ 330 и НМР 155 находились в активном состоянии в течение 2.5 мин; WindSonic и SMP11 – 10 мин; гидрологические приборы ECO Triplet и C-star – не более 1.5 мин; акустический измеритель скорости течения профилограф Aquadopp – 12 мин; регистратор характеристик волн Wavesense – 30 мин. Однако бортовой компьютер для определения результатов использовал реализации данных меньшей длительности, т.к. сложные измерительные системы перечисленных приборов после подачи питания требуют «прогрева» и автоматической настройки. В частности, используемые исходные ряды данных профилографа Aquadopp формировались в течение 10 мин, через 2 мин после включения, а Wavesense в течение 20 мин, через 10 мин после подачи питания.

Регистрация данных наблюдений, исключая время профилактики оборудования измерительного комплекса и очистки его от водорослей, осуществлялась с 10:00 21 апреля до 7:00 21 июня и с 12:00 29 июня до 14:00 23 декабря 2016 г. (указано время часового пояса г. Владивосток). Сформированный бортовым компьютером буя массив данных измерений с шагом по времени 1 час состоит примерно из 5720 величин по каждому из параметров, указанных в таблице 1.

Метеорологические характеристики и температура воды в приповерхностном слое

Данные длительного натурного эксперимента комплекса WaveScan сопоставлялись с временными рядами измерений на ближайшей к месту постановки буя метеорологической станции Посъет, входящей в базу данных WMO (WMOID=31969, <http://rp5.ru>), а также с временными рядами метеорологических реанализов:

1) NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis R-2 (Earth System Research Laboratory, NOAA, www.esrl.noaa.gov) с разрешением по пространству $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ и по времени 6 часов (Kanamitsu et al., 2002);

2) ERA-Interim (Dee et al., 2011) с разрешением по пространству $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ и по времени 3 часа (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, ECMWF, ресурс “analysis and forecast”: <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>);

3) ERA5 (Hersbach et al., 2020) с разрешением метеорологических характеристик по пространству $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ и по времени 1 час (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>). Параметры ветровых волн и зыби выбирались из реанализа ERA5 с разрешением по пространству 0.5° и по времени 1 час, как и данные WaveScan.

Температура воды, измеренная термометром профилографа Aquadorp на глубине 1.5 м, сопоставлялась с временными рядами ТПО из реанализа ERA-Interim (T_E) и реанализа спутниковых наблюдений OSTIA, где глобальные поля ТПО (T_{SST}) имеют разрешение по пространству $1/20^{\circ}$ и по времени 1 сутки (<https://podaac-opendap.jpl.nasa.gov/opendap/allData/ghrsst/data/L4/GLOB/UKMO/OSTIA/>; https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001; https://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/JCOMM-TR/J-TR-59-MARCDAT-III/ppts/C8-Roberts_Jones-OSTIA.pdf).

Отметим, что метеорологическая станция Посъет ($42^{\circ} 39'$ с.ш., $130^{\circ} 48'$ в.д., высота над уровнем моря – 36 м) расположена в 29 км от места постановки буя WaveScan. По данным реанализов NCEP-DOE и ERA-Interim с помощью приложения Regrid (программный комплекс Earth System Modeling Framework, ESMF) мы формировали временные ряды метеорологических характеристик непосредственно для района, включающего точку в окрестности постановки буя WaveScan. В соответствии с горизонтальным разрешением реанализов выборка метеорологических данных из NCEP-DOE включала 4 узла широтно-долготной сеточной области

этого реанализа, а из ERA-Interim и ERA5 16 узлов сетки, по которым выполнялась интерполяция данных каждого реанализа в точку установки буя с помощью метода (Gu et al., 2004; Khoei and Gharehbaghi, 2007), реализованного в приложении RegridWeightGen программного комплекса Earth System Modeling Framework, ESMF. Повторяемость скорости приводного ветра различных направлений по данным измерений метеостанции комплекса WaveScan сопоставлялась с данными двух версий реанализа высокого разрешения: ERA-Interim и ERA5, причем с временными рядами как ближайшего узла сетки этих реанализов, так и полученных путем интерполяции в точку установки буя. Временные ряды характеристик ветровых волн с шагом 1 час по данным буя сопоставлялись с данными ближайшего узла сеточной области реанализа ERA5.

Согласно данным измерений комплекса приборов WaveScan в указанный период 2016 г. метеорологические параметры изменялись в следующих пределах: давление (P) – 975–1035 гПа, температура приводного воздуха (Θ) – от -10.86°C до $+26.8^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха (H) – 30–100%. Измеренный падающий поток коротковолновой солнечной радиации (R) достигал максимума – 1060 Вт/м^2 в полуденные часы в конце мая, что составляет 70% от величины солнечной постоянной (потока коротковолновой радиации на внешнюю границу атмосферы). Максимальные значения скорости ветра, полученные на бортовом компьютере буя усреднением в пределах 10-минутного интервала измерений в конце каждого часа, наблюдались в холодный период года и достигали 16 м/с с порывами до 24 м/с. Температура морской воды (T), измеренная термометром профилографа Aquadorr на горизонте 1.5 м, имеет характерный для исследуемого района залива Петра Великого годовой ход: рост от 4°C в апреле до $25\text{--}27^{\circ}\text{C}$ в середине августа и уменьшение до 1°C в середине декабря.

Статистические связи между временными рядами (с 1 мая по 23 декабря 2016 г.) рассмотренных средних суточных метеорологических характеристик по данным комплекса WaveScan, метеостанции Посъет и метеорологических реанализов имеют высокую доверительную вероятность – 99%. Коэффициенты корреляции для рядов большинства измеряемых характеристик близки к 1. Между рядами атмосферного давления, измеренных на WaveScan и метеостанции Посъет, $K_p \approx 0.999$ при среднем квадратичном отклонении (СКО) 0.25 гПа, между WaveScan и реанализами ERA-Interim, NCEP $K_p \approx 0.98$ при СКО ≈ 1.75 гПа и $K_p \approx 0.97$ при СКО ≈ 2 гПа, соответственно.

Коэффициент корреляции между рядами температуры воздуха по данным WaveScan и метеостанции Посъет составляет $K_{\Theta} \approx 0.98$ и между соответствующими рядами влажности воздуха – $K_H \approx 0.95$. При этом разность $\Theta_B(t) - \Theta_W(t)$ между значениями температуры воздуха, измеренными WaveScan Buoy (Θ_B) и на метеостанции Посъет (Θ_W), изменяется от отрицательных значений (-4°C) весной и в начале лета (температура воздуха над сушей выше, чем над морем) до положительных значений ($+4^{\circ}\text{C}$) с середины октября до середины декабря (рис. 2б).

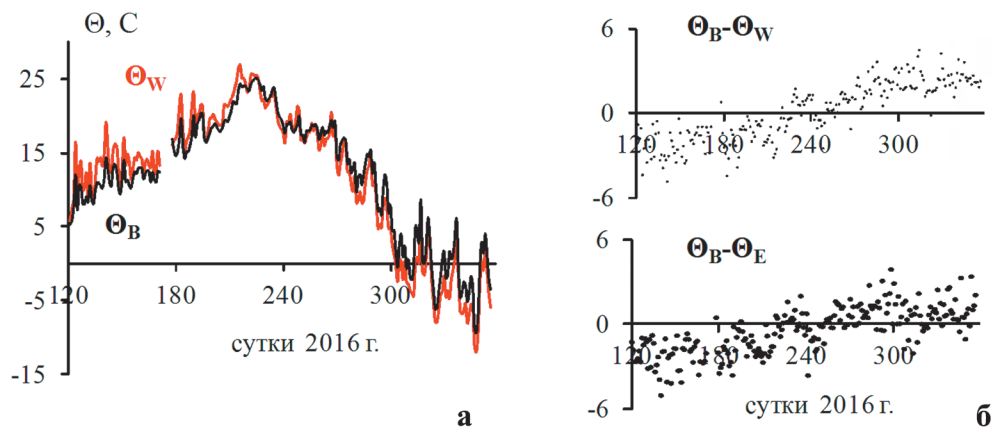


Рис. 2. Временные ряды (с 1 мая по 23 декабря 2016 г.) температуры воздуха, измеренной комплексом приборов WaveScan в приводном слое на высоте 3.5 м (Θ_B , черная кривая) и на метеостанции Посьет (Θ_W , красная кривая) (а). Разности между величинами этих рядов ($\Theta_B - \Theta_W$), и между рядами температуры воздуха на буе (Θ_B) и реанализа ERA-Interim (Θ_E) (б). На оси x указаны порядковые номера суток с 1 января 2016 г.

Минимальные контрасты температуры воздуха над сушей и морем $\pm 1^\circ\text{C}$ наблюдались в августе–сентябре. Разность величин относительной влажности воздуха: $H_B(t) - H_W(t)$ имеет наибольшие различия в мае и ноябре–декабре до 20–15%, при максимальных температурных контрастах суша–море, и минимальные отличия (менее 7%) в августе–сентябре, при минимальных температурных контрастах.

Показания пиранометра комплекса WaveScan $R_B(t)$ и данные о потоке падающей коротковолновой солнечной радиации из реанализа ERA-Interim $R_E(t)$, осредненные по пятидневным периодам, имеют наибольшие расхождения – до 100 Вт/м^2 – во время летнего муссона, когда наблюдались туман и переменная облачность. В периоды преобладающей ясной погоды, в том числе осенью и в начале декабря 2016 г., отличия $\Delta R(t) = R_B(t) - R_E(t)$ находились в пределах заявленной систематической погрешности пиранометра SMP11, $\pm 20 \text{ Вт/м}^2$.

Измерения метеостанцией буя WaveScan вектора скорости ветра сравнивались с данными реанализа ERA-Interim и прибрежной метеостанции Посьет. Анализировались повторяемости среднего суточного направления ветра по 16 румбам за период наблюдений (рис. 3а), а также средние месячные потоки кинетической энергии ветра на единичную вертикальную площадку (рис. 3б). В начале холодного периода года и зимнего муссона, с 15 октября по 23 декабря 2016 г., в измерениях буя WaveScan и данных метеорологического реанализа ERA-Interim повторяемости в секторе СЗ–ССЗ румбов ветра составляют 27.4% и 26.2% соответственно. При ветре южных румбов, характерном для летнего муссона, повторяемость направления скорости ветра по бую и реанализу в секторе ЮЮЗ–ЮЮВ имеют заметные расхождения, обусловленные большей изменчивостью направления относительно слабого ветра в районе постановки буя WaveScan, возможно, связанного с влиянием о. Фуругельма, который, из-за небольших размеров, не отражается на вычислительной сетке реанализа.

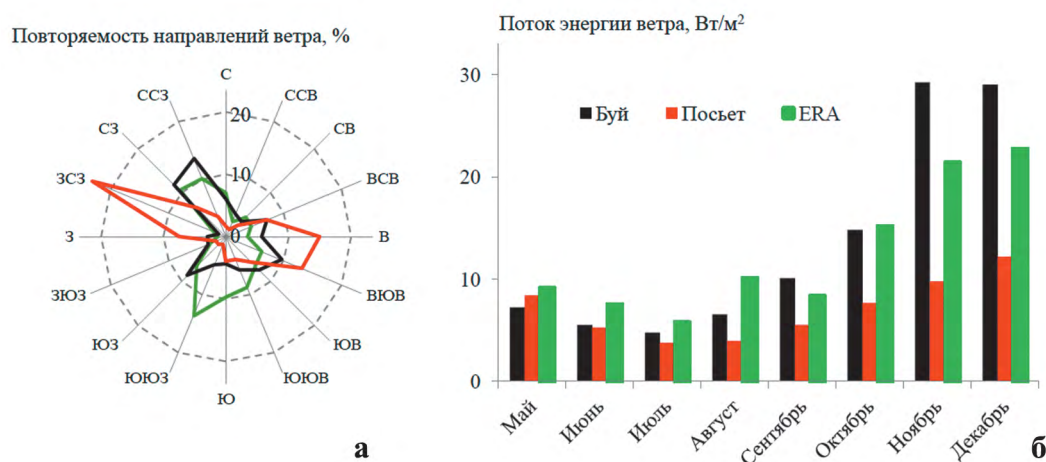


Рис. 3. Повторяемость (%) среднего суточного направления ветра за период наблюдений с 1 мая по 23 декабря 2016 г. (а), и средние месячные значения потока кинетической энергии ветра (б) по данным буя WaveScan (черный), метеостанции Посьет (красный) и реанализа ERA5 (зеленый).

По данным метеостанции комплекса WaveScan в районе его постановки в период зимнего муссона средние месячные величины потока кинетической энергии ветра любого направления в 2–3 раза превышали величины этого потока в период летнего муссона. При сопоставлении потоков кинетической энергии ветра, рассчитанных по WaveScan и ERA-Interim, установлено, что в теплый сезон модель реанализа завышает значения этих потоков в среднем на 15–20%, а в холодный сезон (период измерений ноябрь–декабрь) занижает в среднем на те же 15–20% по отношению к рассчитанным по данным измерений (рис. 3б). Другими словами при относительно слабом ветре южных румбов летом модель реанализа завышает скорость ветра в исследуемом районе залива Петра Великого, а при сильном ветре северо-западных и северных румбов в холодный сезон занижает, что является результатом пространственного осреднения в модели реанализа.

Повторяемость направления скорости ветра различных румбов и средние месячные значения потока его кинетической энергии, представленные на рис. 3а и 3б, указывают на значительные отличия характеристик ветра на суше в районе метеорологической станции Посьет (WMOID=31969) и на шельфе залива по данным WaveScan и ERA5.

В период зимнего муссона 2016 г. ветер на метеорологической станции в поселке Посьет, преимущественно западный, отличался на $25\text{--}35^\circ$ по направлению от ветра в районе комплекса WaveScan. При этом поток кинетической энергии ветра на метеостанции оказался вдвое меньшим, чем в районе постановки буя (рис. 3б). Эти расхождения обусловлены особенностями орографии в районе метеостанции, высотой 36 м над уровнем моря, а также отличиями динамических процессов в пограничном слое над сушей и морем.

Основное отличие между диаграммами повторяемости скорости ветра различных румбов по наблюдениям на буе и данным реанализов, как ERA5 (рис. 3),

так и ERA-Interim – существенное занижение повторяемости ветра южного (Ю) и юг–юго-западного (ЮЮЗ) румбов в данных измерений комплекса WaveScan по отношению к данным реанализов. Это отличие не зависит от того, используем мы временной ряд скорости ветра в ближайшем к бую узле сетки реанализа или интерполируем в точку установки буя по значениям в окружающих узлах сетки. Такое отличие может быть связано с отсутствием в реанализах влияния циркуляции воздуха вокруг небольшого по площади острова Фуругельма, имеющего длину – 2.5 км, ширину – 1.5 км, а максимальную высоту – 120 м.

Измерения температуры воды осуществлялись термометром профилографа Aquadopp в течение последних 10 мин каждого часа на горизонте 1.5 м. К сожалению, мы не можем оценить степень достоверности заявленной точности (0.1°C) этих измерений, поскольку отсутствуют синхронные измерения вертикальных профилей температуры воды другими приборами или датчиками. Выполнены оценки статистической связи между временными рядами средней суточной температуры воды $T_B(t)$ по данным буя за период с 1 мая по 23 декабря 2016 г. с временными рядами ТПО из реанализов ERA-Interim $T_E(t)$ и OSTIA (T_{SST}). Эти временные ряды представлены на рис. 4. Коэффициенты корреляции составляют 0.98 при $\text{СКО} \approx 1.3^{\circ}\text{C}$ и 0.97 при $\text{СКО} \approx 1.9^{\circ}\text{C}$ соответственно. Минимальные отличия средних суточных значений температуры воды, измеренной термометром на глубине 1.5 м, от ТПО из реанализов ERA-Interim и OSTIA отмечаются в теплый период года до и после достижения летнего максимума температуры воды. По данным буя максимальное среднее суточное значение измеренной температуры летом примерно на 2°C выше (рис. 4), чем по данным ERA-Interim и OSTIA, где есть влияние пространственного осреднения и сглаживания. Наибольшие отличия температуры воды по данным буя от ТПО характерны для холодного сезона, когда в OSTIA несколько завышаются значения ТПО по отношению к данным буя, а в реанализе ERA-Interim занижаются (рис. 4).

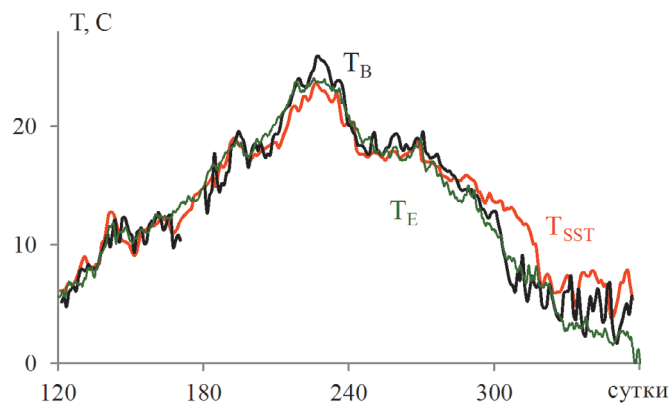


Рис. 4. Временные ряды (с 1 мая по 23 декабря 2016 г.) средней суточной температуры морской воды по данным измерений WaveScan buoy на горизонте 1.5 м (T_B), а также ТПО реанализов ERA-Interim (T_E) и OSTIA (T_{SST}) в районе постановки буя.

Характеристики волн на поверхности моря

По данным 20-ти минутных измерений трех акселерометров регистратора Wavesense 3 в конце каждого часа бортовым компьютером бую рассчитывались спектры волн на поверхности моря и спектральные моменты m_n как для всего частотного диапазона $0 < f < \infty$ Гц:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n \cdot S(f) df,$$

так и для каждого из двух заданных частотных диапазонов: диапазона низких частот $0.04 \leq f_a < 0.1$ Гц, периоды $10 < T_a \leq 25$ с или длинных волн «а», соответствующих волнам зыби, и диапазона высоких частот $0.1 \leq f_b < 0.5$ Гц, периоды $2 < T_b \leq 10$ с или коротких волн «б», куда входят ветровые волны и может входить зыбь. Три временных ряда значительной высоты волн (H) рассчитывались процессором бую по формуле:

$$H(f) = 4\sqrt{m_0}, \quad (1)$$

где m_0 – нулевой момент соответствующего спектра.

Три временных ряда периода волн T определялись отношением нулевого момента (m_0) спектра к первому (m_1) моменту (Tm_0/m_1) каждого из спектров:

$$T(f) = \frac{m_0}{m_1}, \quad (2)$$

Соответствующие временные ряды среднего спектрального направления распространения волн рассчитывались из отношения двух первых Фурье коэффициентов:

$$\theta(f) = \arctan \left[\frac{b_1(f)}{a_1(f)} \right], \quad (3)$$

где $a_1(f) = \frac{1}{S(f)} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \cdot \cos \theta d\theta$ и $b_1(f) = \frac{1}{S(f)} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \cdot \sin \theta d\theta$.

Для сопоставления временных рядов характеристик волн использовались данные ближайшей точки сетки из реанализа ERA5 с координатами: $42^\circ 30'$ с.ш., $131^\circ 00'$ в.д., глубиной 50 м, расположенной в 9.2 км в направлении на север-северо-восток от бую WaveScan. По батиметрической карте залива Петра Великого глубина шельфа в этой точке около 50 м, а в модели ветровых волн реанализа ERA5 существенно завышена и составляет 123 м. Анализировались 5 фрагментов временных рядов высоты (1), периода (2) и направления распространения (3) волн, измеренных в течение 20 суток в разные месяцы: фрагмент с 1 по 20 мая, когда наблюдались как прохождение глубокого внетропического циклона со штормовым ветром, так и погода со слабым ветром; фрагменты с 1 по 20 июня и с 1 по 20 июля, когда наблюдались

условия характерного летнего муссона и не было интенсивных циклонов; фрагмент с 25 августа по 14 сентября, включающий прохождение тайфуна Лайонрок 31 августа и 1 сентября 2016 г.; фрагмент с 1 по 20 ноября, когда наблюдались характерные условия зимнего муссона с эпизодическим интенсивным ветровым воздействием.

В первую очередь, мы определили, какие характеристики волн по данным реанализа ERA5 имеют наилучшие статистические связи с характеристиками волн, рассчитанными процессором буя с использованием нулевого и первого моментов спектра всего частотного диапазона ветровых волн и зыби. На рис. 5 приведены именно такие временные ряды характеристик волн по данным буя и реанализа. Коэффициенты корреляции между рядами данных наблюдений и реанализа, представленных на рис. 5 для высоты значительных волн (1) и их среднего периода (2),

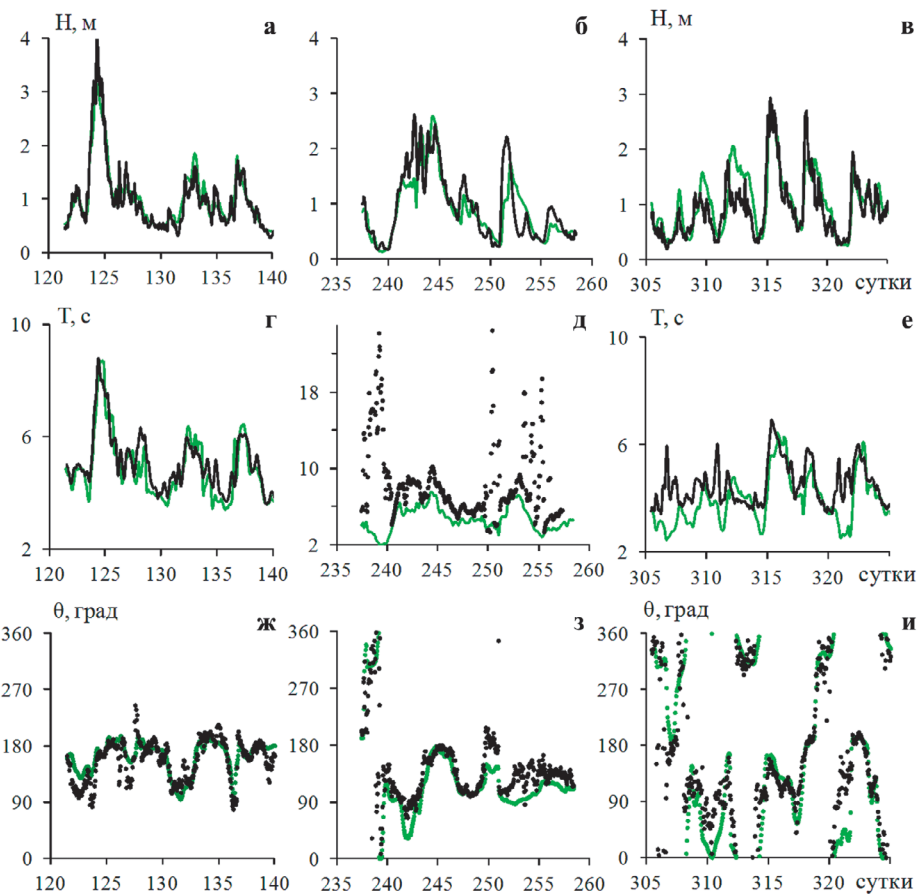


Рис. 5. Временные ряды значительной высоты волн $H(t)$ (а, б, в), рассчитанной из нулевого момента спектра (1) всего частотного диапазона волнения, среднего периода (2) волн $T_{m0/m1}$ (г, д, е), среднего спектрального направления распространения волн $\theta(t)$ (ж, з, и) и соответствующие временные ряды реанализа ERA5 (зеленые кривые) значительной высоты комбинированных ветровых волн и зыби (а, б, в), среднего периода волн $T_{m0/m1}$ (г, д, е) и среднего спектрального направления распространения волн (ж, з, и) для каждого из трех временных интервалов с 1 по 20 мая (а, г, ж), с 25 августа по 14 сентября (б, д, з) и с 1 по 20 ноября (в, е, и). На горизонтальной оси X указаны порядковые номера суток с 1 января 2016 г. Волны распространяются с севера при $\theta(t) = 360^\circ/0^\circ$, с юга при $\theta(t) = 180^\circ$, с востока при $\theta(t) = 90^\circ$, с запада $\theta(t) = 270^\circ$.

изменялись в пределах от 0.96 до 0.83 в зависимости от месяца при СКО 0.17–0.20 м для высоты волн и СКО 0.15–0.24 с для периода волн. Доверительные вероятности этих статистических связей составляют 99% по критериям Стьюдента и Фишера. В холодный период года с 1 по 20 ноября (рис. 5в, е, и) коэффициент корреляции между отмеченными временными рядами характеристик волн по данным измерений и реанализа лишь на 0.1 ниже для высоты и периодов волн, чем в теплый сезон.

На основании анализа пяти 20-ти суточных фрагментов (три представлены на рис. 5), установлено, что только на одном из них (рис. 5д) данные буя содержат наиболее длинные волны зыби с периодом до 23 с и малой высотой, не превышающей 25 см, которых нет в данных реанализа ERA5 (зеленая кривая). Эти длинные волны зыби приходят с юга (рис. 5з) из районов с экстремальной скоростью ветра. В частности, длинные волны, зарегистрированные в конце августа (рис. 5д), обусловлены прохождением тайфуна Лайонрок над центральной частью Японского моря в сторону побережья Приморского края. Аналогичные волны зыби наблюдались по данным буя 7 и 12 сентября 2016 г. (рис. 5з) при прохождении циклонов над Японским морем.

Характеристики волн, рассчитанные по спектрам волнения в диапазонах, отмеченных выше периодов коротких 2–10 с и длинных 10–25 с волн по данным измерений Wavesense 3, а также характеристики ветровых волн и зыби по данным реанализа ERA5 приведены на рис. 6.

По данным реанализа ERA5 средние спектральные периоды ветровых волн на временном интервале с 1 по 20 мая находились преимущественно в диапазоне от 1.4 до 3.5 с при малой и средней скорости ветра до 5 м/с и возрастали до 5.8 с при сильном ветре во время прохождения циклона 4–5 мая, а волны зыби (Mean period of total swell) имели преимущественно периоды от 4 до 10 с (рис. 6б).

Значительные высоты волн по данным измерений Wavesense 3 в заданных диапазонах периодов коротких 2–10 с (красные кривые на рис. 6а, в) и длинных волн 10–25 с (черные кривые на рис. 6а, в), достигали наибольших значений – 2.9 м и 3.6 м соответственно, 4 и 5 мая во время прохождения внетропического циклона (982 гПа, см. рис. 7а) над заливом Петра Великого. При достижении тайфуном Лайонрок районов Приморского края 29 августа–2 сентября 2016 г. метеостанция буя WaveScan также зафиксировала минимум приводного атмосферного давления – 975 гПа. Но в этот период регистрировались меньшие по величине значительные высоты как коротких (2.5 м), так и длинных (1.7 м) волн, чем 4–5 мая, поскольку наибольшая скорость ветра в тайфуне Лайонрок наблюдалась над сушей.

Статистическая связь между рядами значительной высоты волн зыби по реанализу и значительной высоты коротких волн 2–10 с волн по данным Wavesense 3 (рис. 6в, г) имеет высокую доверительную вероятность 99% (коэффициент корреляции 0.9). При прохождении циклона 4–5 мая над заливом Петра Великого отмечаются так же высокие коэффициенты корреляции (0.6) высоты ветровых волн по данным ERA5 и высоты длинных волн в диапазоне периодов 10–25 с по данным Wavesense 3 (рис. 6в, г).

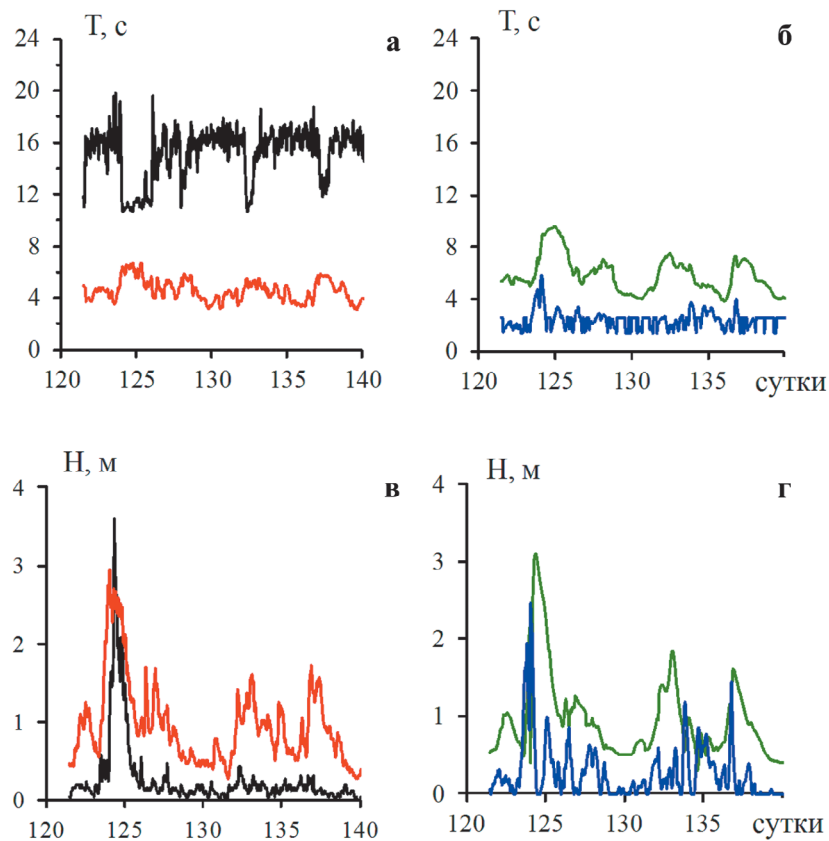


Рис. 6. Временные ряды среднего периода T (2) коротких волн в заданном диапазоне 2–10 с (красная кривая) и волн зыби (длинных волн) в диапазоне 10–25 с (черная кривая) (а), значительной высоты H (1) коротких (красная кривая) и длинных (черная кривая) волн (в), рассчитанные процессором буя по данным регистратора Wavesense 3, а также временные ряды из реанализа ERA5: среднего периода волн зыби (Mean period of total swell) (зеленая кривая), среднего периода ветровых волн (Mean wave period based on first moment for wind waves) (синяя кривая) (б), значительной высоты общей зыби (Significant height of total swell) и значительной высоты ветровых волн (Significant height of wind waves) (г) с 1 по 20 мая 2016 г. На горизонтальной оси X указаны порядковые номера суток с 1 января 2016 г.

Отметим, что самые короткие ветровые волны с периодами 1.5–2.5 с, представленные в реанализе (рис. 6б, синяя кривая), практически отсутствуют в данных Wavesense 3 (из-за установленного ограничения, связанного с собственной частотой колебаний буя, 0.5 Гц). В моделях же реанализа на северо-западном шельфе залива Петра Великого отсутствуют зарегистрированные Wavesense в конце августа длинные волны зыби малой высоты (менее 25 см) с периодом до 23 с (рис. 5б, д), распространяющиеся с юга. Появление этих длинных волн связано с прохождением тайфуна Лайонрок над глубокой частью Японского моря. При подходе этого тайфуна к побережью Приморского края его центр находился к северо-востоку от залива Петра Великого и зыбь с существенно меньшим периодом 7–8 с и значительно большей высотой – до 2.5 м распространялась с севера, а на следующие сутки с востока и затем с северо-востока. Такая зыбь 31 августа–1 сентября представлена так-

же в данных реанализа (рис. 5) и хорошо согласуется с измерениями Wavesense 3. Более детальное сопоставление с данными реанализа ERA5 всех характеристик волн на поверхности моря, в том числе волн максимальной высоты, рассчитанных процессором буя, планируется опубликовать в отдельной статье.

Скорость течения

Вектор скорости течения измерялся в 12 слоях моря акустическим доплеровским профилографом Aquadopp, который включался на 46 минуте каждого часа. Измерения производились в течение 10 мин с частотой опроса 1 Гц и размером ячейки 4 м. Излучатель профилографа со встроенным датчиком измерения температуры морской воды находился на глубине 1.5 м. Измерения вектора скорости течения выполнялись от ячейки подповерхностного слоя между горизонтами 2 м и 6 м (средний горизонт 4 м) до придонного слоя 46–50 м (средний горизонт 48 м) при глубине моря 50 м. Обработанные процессором буя данные измерений в течение 10 минут модуля и направления скорости течения передавались и записывались для середины каждого слоя, начиная с горизонта 4 м, заканчивая придонным горизонтом 48 м с шагом по времени 1 час.

Для предварительного анализа этих измерений мы определили средние по вертикали меридиональную $V_{Bn}(t)$ и зональную $U_{Bn}(t)$ компоненты скорости течения с шагом по времени 1 час. Рассчитав разность между векторами измеренной скорости и средней по вертикали, мы получили вектор отклонения скорости течения от средней по вертикали. На рис. 7а–в показаны временные ряды измеренного приводного атмосферного давления $P_a(t)$ с 1 мая по 23 декабря 2016 г., а также аномалии меридиональной и зональной компонент вектора средней по вертикали скорости течения, представленные в безразмерном виде. Эти компоненты нормировались на усредненный за указанный период модуль средней по вертикали скорости течения. На эту же величину нормировались и компоненты векторов разности между измеренной и средней по вертикали скоростями течения. Изменения этих векторов с глубиной показаны на рис. 8, 9.

Временные ряды компонент течения $V_{Bn}(t)$ и $U_{Bn}(t)$ (рис. 7б, в) характеризуют реакцию полного потока всего водного слоя на синоптическую изменчивость в атмосфере (рис. 7а). Основные экстремумы спектров этих рядов находятся в пределах атмосферного синоптического масштаба и совпадают на периодах 3–4 и 7–8 суток. Согласно показаниям датчика давления буя, экстремальное событие 2016 г., а именно прохождение тропического циклона Лайонрок, сопровождалось падением давления на 34 гПа в течение двух суток – от 1009 гПа 0:00 29 августа до 975 гПа 5:00 31 августа. При этом первые 19 часов 29 августа скорость приводного ветра увеличивалась от 1 м/с до 10.8 м/с и последующие 14 часов удерживалась на уровне 10–11 м/с с порывами до 16 м/с. Затем в 9:00 30 августа скорость ветра понизилась до 5.2 м/с, но через 13 часов произошло резкое усиление ветра, и в 3:00 31 августа его скорость достигла максимума, 13.5 м/с с порывами до 17.7 м/с, что связано

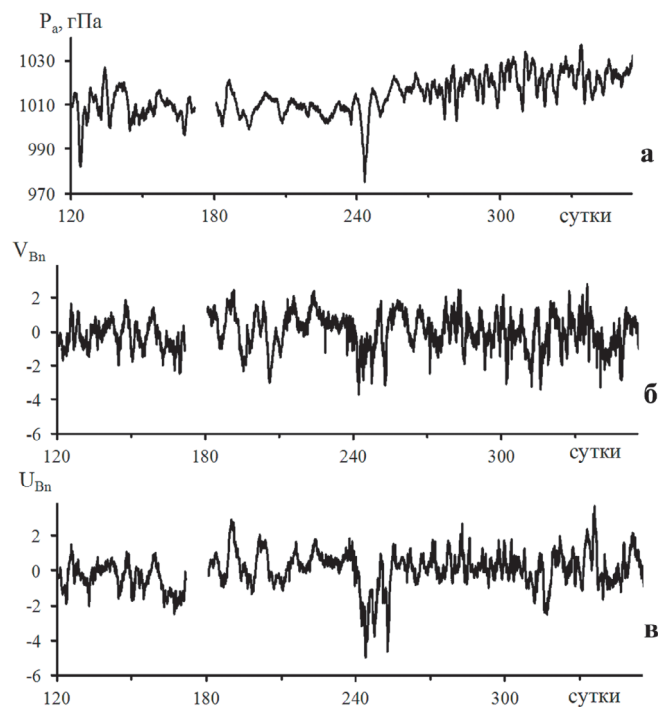


Рис. 7. Временные ряды параметров, измеренных комплексом WaveScan: приводного атмосферного давления $P_a(t)$ (гПа) (а) и нормализованных аномалий меридиональной $V_{Bn}(t)$ (б) и зональной $U_{Bn}(t)$ (в) составляющих вектора средней по вертикали скорости течения с 1 мая по 23 декабря 2016 г. с шагом по времени 1 час. На горизонтальной оси X указаны порядковые номера суток с 1 января 2016 г.

с прохождением центра циклона Лайонрок. В последующий период, к 2 сентября, атмосферное давление достигло значения 1009 гПа, а скорость ветра в течение четырех суток колебалась в диапазоне 5–11 м/с и только к утру 5 сентября понизилась до 3 м/с.

Таким образом, во время прохождения тропического циклона Лайонрок развитие циркуляции на шельфе залива Петра Великого с 29 августа по 5 сентября 2016 г. происходило при существенном нестационарном ветровом воздействии. При анализе на этом временном интервале исходного ряда измеренного вектора скорости течения мы определили, что модуль этого вектора достиг максимального значения 92 см/с в четырехметровом слое между горизонтами 18 и 22 м в 3:00 1 сентября 2016 г., т.е. через 24 часа после максимального ветрового воздействия в районе установки буя. При этом средняя скорость течения во всем слое воды от 2 до 48 м достигала 75 см/с. Близкое значение средней по вертикали скорости течения наблюдалось через 7 суток, 9 сентября 2016 г. В обоих случаях доминировала аномалия зональной компоненты скорости, и полный поток течения от поверхности до дна был направлен на юго-запад. Близкие максимальные значения как меридиональной составляющей, так и модуля средней по вертикали скорости течения южных румбов, наблюдались в холодный сезон, в ноябре и декабре 2016 г. (рис. 7б, в) при доминирующем северо-западном ветре.

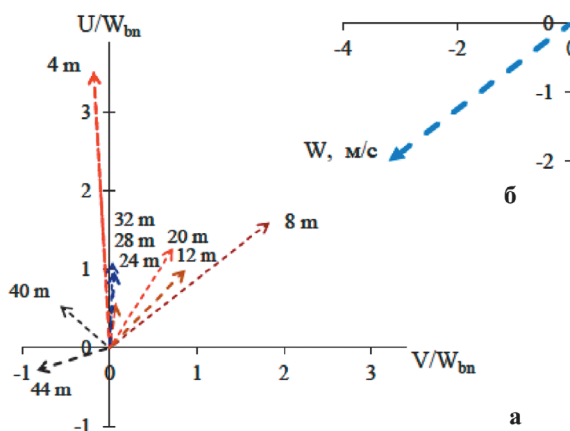


Рис. 8. Изменение с глубиной нормированного вектора разности между векторами измеренной и средней по вертикали скоростей течения, усредненное с 0:00 по 23:00 20 августа 2016 г. (а), при среднем за этот же период северо-восточном ветре 4 м/с (б).

Второй по величине экстремум низкого приземного атмосферного давления (982 гПа) наблюдался на 125 сутки 2016 г., т.е. 4 мая во время прохождения глубокого внетропического циклона над прилегающей к заливу акваторией Японского моря. В этом случае средняя по вертикали скорость течения достигла 50 см/с.

В теплый сезон при хорошо выраженном сезонном пикноклине максимум измеренной скорости течения часто наблюдался в приповерхностном слое 2–6 м (средний горизонт 4 м), где скорость течения обусловлена суммой векторов дрейфовой (экмановской) и градиентной составляющих, обусловленной наклоном уровня моря. Значительная и максимальная на вертикальном профиле скорость течения наблюдались также и в сезонном пикноклине на одном из горизонтов от 8 до 24 м. Изменение с глубиной нормированного вектора разности между векторами измеренной и средней по вертикали скорости течения при различном ветровом воздействии представлено на рис. 8, 9. Нормирование компонент вектора скорости течения производится на одну и ту же константу. Поэтому приведенные на рис. 8 и 9 углы поворота векторов скорости с глубиной в точности соответствуют углам поворота измеренной скорости течения.

При отсутствии сильного ветра в теплый период года вектор скорости течения ниже приповерхностного слоя трения в сезонном пикноклине имеет значительный левый поворот, угол которого достигает 170° в придонном слое шельфа (рис. 8). Соответственно у дна, в слое 42–46 м, наблюдается противотечение по отношению к течению в слое скачка плотности на горизонтах от 8 до 12 м. Вертикальные профили частоты плавучести в юго-западной части залива Петра Великого приведены в работах (Кошелева и др., 2018; Kosheleva et al., 2015).

При прохождении интенсивных тропических или внетропических циклонов в теплый сезон, в нашем случае тайфуна Лайонрок 29 августа–2 сентября 2016 г., угол левого поворота вектора скорости течения с глубиной уменьшается до 20° и противотечение в придонном слое отсутствует (рис. 9).

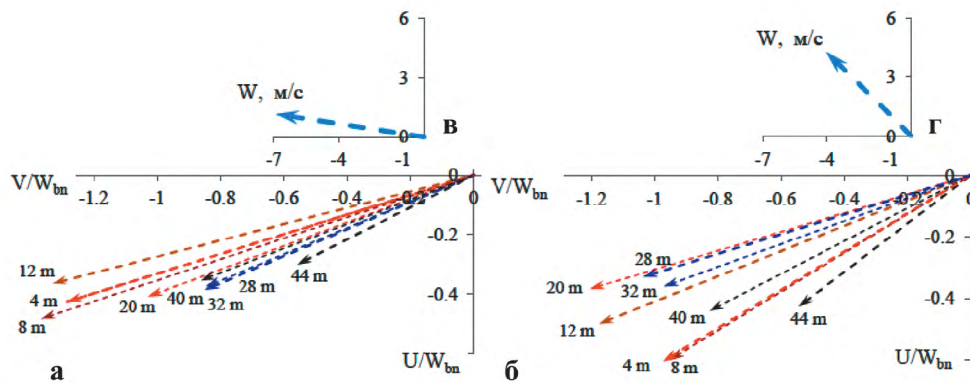


Рис. 9. Изменение с глубиной нормированного вектора разности между векторами измеренной и средней по вертикали скоростей течения, усредненное за период с 0:00 по 23:00 31 августа (а) при средней скорости ветра за этот период 9 м/с (в) и за период, смещенный на 12 ч вперед по времени: с 12:00 31 августа по 11:00 1 сентября 2016 г. (б) при средней скорости ветра за этот период 7 м/с (г).

Утром 31 августа 2016 г. центр тропического циклона Лайонрок достиг прибрежных районах Приморья к северо-востоку от залива Петра Великого. Скорость ветра к 3:00 достигла 13.5 м/с с порывами до 17.7 м/с, а средняя суточная скорость ветра составляла 9 м/с (рис. 9в). Левый поворот среднего за сутки вектора скорости течения с глубиной наблюдался от горизонта 12 м до придонного слоя (рис. 9а). Угол левого поворота в этом слое при усилении ветрового воздействия уменьшился до 20°. При смещении периода осреднения на 12 ч вперед средняя за 24 часа скорость ветра уменьшилась до 7 м/с (рис. 9г). При этом угол левого поворота вектора скорости течения, наблюдавшийся от горизонта 20 м до придонного слоя, увеличился в два раза и достиг 40° (рис. 9б).

В холодный период года, при конвективном перемешивании, слабой вертикальной стратификации и отсутствии слоя скачка плотности в приповерхностном слое трения, наблюдается хорошо выраженный правый поворот вектора измеренной скорости течения за счет дрейфовой составляющей скорости. В этом случае ниже верхнего слоя трения вектор отклонения скорости течения от средней по вертикали мал, а средняя в слое 50 м скорость течения отклоняется вправо от направления скорости ветра примерно на 90°, что соответствуют теоретическим представлениям о развитии дрейфовых и градиентных течений в прибрежной зоне однородного по плотности моря.

Оценки корреляций между составляющими скорости течения в сезонном пикноклине и скорости ветра без временного лага показали отсутствие значимых статистических связей как для всего временного ряда измерений комплекса WaveScan, так и для любых выборок временного ряда в теплый период года, в том числе в период прохождения тайфуна Лайонрок. Вместе с тем, выявлена значимая статистическая связь без временного лага между временными рядами скорости течения и приводным атмосферным давлением, что является предметом дальнейших исследований и публикаций.

Заключение

В целом метеорологические характеристики: приводное атмосферное давление, температура и относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра, измеренные приборами буя WaveScan на юго-западном шельфе залива Петра Великого, хорошо согласуются с аналогичными данными метеорологических реанализов NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) and ERA19-Interim. Доверительная вероятность статистических связей между отмеченными данными метеорологических наблюдений и реанализов составляет 99%.

Показано, что временные ряды характеристик волн, рассчитанные процессором буя WaveScan для всего спектрального диапазона волнения на поверхности моря, а именно – значительная высота волн, рассчитанная из нулевого спектрального момента, средний период волн, рассчитанный как отношение нулевого спектрального момента к первому, и среднее спектральное направление распространения волн, имеют наилучшие статистические связи, доверительная вероятность которых составляет 99%, с соответствующими характеристиками волн из реанализа ERA5: значительной высотой комбинированных ветровых волн и зыби, средним периодом и средним спектральным направлением распространения волн. Приборами буя не регистрируются короткие ветровые волны с периодами менее 2 с, имеющиеся в модели реанализа. В реанализе ERA5 не моделируются полученные по данным измерений буя WaveScan самые длинные волны зыби с периодом около 23 с и малой высотой, не превышающей 25 см, в частности, распространяющиеся с юга в период прохождения тропического циклона Лайонрок в конце августа 2016 г. над центральной частью Японского моря.

Определены зависящие от скорости ветра особенности изменчивости вертикальных профилей вектора скорости течения на синоптическом и сезонном масштабах. В теплый период года, при отсутствии сильного ветра ниже приповерхностного слоя трения, в сезонном пикнолине наблюдается значительный левый поворот вектора измеренной скорости с глубиной. При этих условиях угол левого поворота вектора течения достигает 170° в придонном слое шельфа, где наблюдается противотечение по отношению к течению в слое максимального вертикального градиента плотности на горизонтах от 8 до 12 м. При значительном усилении ветра, например, в период прохождения интенсивных тропических или внутротропических циклонов в теплый сезон, в частности тропического циклона Лайонрок 31 августа–1 сентября 2016 г., угол левого поворота вектора скорости течения с глубиной уменьшается до 20° и противотечение в придонном слое отсутствует. При ослаблении ветра этот угол левого поворота вектора скорости течения с глубиной в течение суток увеличивается до 40° . Обнаружен эффект запаздывания максимальной скорости течения от максимального воздействия ветра примерно на одни сутки, хорошо выраженный в период усиления и ослабления ветра во время выхода тропического циклона Лайонрок 31 августа 2016 г. с юга к побережью Приморского края, восточнее залива Петра Великого.

В холодный период года при конвективном перемешивании, слабой вертикальной стратификации и отсутствии сезонного слоя скачка плотности наблюдается хорошо выраженный правый поворот вектора измеренной скорости течения в приповерхностном слое трения за счет дрейфовой составляющей скорости. Вектор средней по вертикали скорости течения, как и вектор полного потока дрейфового течения по Экману, отклоняются на 90° вправо от вектора скорости ветра. Этот результат измерений скорости течения не противоречит теоретическим представлениям о течениях в мелком, однородном по плотности, море.

За весь период измерений на буе WaveScan абсолютный максимум скорости течения – 92 см/с – наблюдался в 3:00 1 сентября 2016 г. в сезонном пикноклине во время прохождения тайфуна Лайонрок (975 гПа), через сутки после максимального ветрового воздействия (13.4 м/с, порывы до 17.7 м/с). Значительные высоты волн 31 августа достигали 3.7 м. Максимальные значительные высоты волн были зарегистрированы измерительным комплексом буя во время прохождения глубокого внетропического циклона (982 гПа) над заливом Петра Великого 4–5 мая 2016 г. В частности, в утренние часы 4 мая величина значительной высоты волн, рассчитанная по данным регистратора Wavesense, достигала 4.3 м.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 5 ТОИ ДВО РАН «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик Дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана» (0271-2016-0005, регистрационный номер АААА-А17-117030110042-2), а также гранта 18-И-010 приоритетной программы ДВО РАН «Дальний Восток». Авторы благодарят сотрудников ТОИ ДВО РАН А.Н. Дрогу, А.Е. Суботэ и В.К. Фищенко за организацию оперативной передачи, визуализации и хранения данных, а также сотрудников Южного района Дальневосточного морского заповедника и оперативного отряда Пограничного управления ФСБ России по Приморскому краю за помощь в проведении измерений.

Литература

- Винокурова Т.Т.* О сезонной и краткочерпной изменчивости гидрологических характеристик в заливе Петра Великого // Известия ТИНРО. 1977. Т. 101. С. 7–12.
- Винокурова Т.Т., Скоклева Н.М.* Временная изменчивость океанографических условий в заливе Посьета // Известия ТИНРО. 1980. Т. 104. С. 29–35.
- Григорьева Н.И., Кучерявенко А.В.* Краткая гидрологическая характеристика залива Посьета. Владивосток: ТИНРО–Центр, 1995. 95 с. Деп. в ВИНТИ 21.08.95. № 2466–В9535.
- Григорьева Н.И., Вышкварцев Д.И., Кучерявенко А.В., Новожилов А.В.* Течения в мелководных бухтах залива Посьета. Владивосток: Институт биологии моря ДВО РАН, 1996. 24 с. Деп. в ВИНТИ 21.01.97. № 156-В97.
- Григорьева Н.И., Кучерявенко А.В.* Гидрологические условия юго-западной части зал. Петра Великого // Известия ТИНРО. 2002. Т. 131. С. 78–95.
- Дубина В.А., Катин И.О.* Особенности трансграничного переноса поверхностных вод в северо-западной части Японского моря по многолетним спутниковым наблюдениям // Вестник ДВО РАН. 2018. № 6. С. 13–19.

- Дубина В.А., Файман П.А., Пономарев В.И. Вихревая структура течений в заливе Петра Великого // Известия ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 247–258.
- 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 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29.
- Кошелева А.В., Лазарюк А.Ю., Яроцук И.О., Коротченко Р.А., Гулин О.Э., Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Швырев А.Н. Акустико-океанологическое моделирование гидрофизических параметров морской воды по измерениям температуры в шельфовой зоне Японского моря // Вестник ДВО РАН. 2018. № 1. С. 25–30.
- Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б. Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 3–15.
- Лазарюк А.Ю., Лобанов В.Б., Пономарев В.И. Эволюция термохалинной структуры вод Амурского залива в холодный сезон // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 59–70.
- Лебедев С.А., Кравченко П.Н. Система комплексного мониторинга состояния морской среды Черного моря // Проблемы постсоветского пространства. 2019. Т. 6. № 3. С. 269–278.
- Мельниченко Н.А., Тювеев А.В., Лазарюк А.Ю., Савченко В.Г., Кустова Е.В. Вертикальное распределение рассола и объемная структура тонкого однолетнего льда Амурского залива по данным методов ядерного магнитного резонанса и магнитно-резонансной томографии // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 859–869. DOI: 10.31857/S0030-1574595859-869.
- Морозов А.Н., Зацепин А.Г., Куклев С.Б., Островский А.Г., Федоров С.В. Вертикальная структура течений в верхней части континентального склона Черного моря в районе Геленджика // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 6. С. 718–727.
- Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А., Машкина И.В. Особенности динамики вод синоптического и субсиноптического масштабов над континентальным склоном Японской котловины и шельфом Приморья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 155–165.
- Пранц С.В., Пономарев В.И., Будянский М.В., Улейский М.Ю., Файман П.А. Лагранжев анализ перемешивания и переноса вод в морских заливах // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 1. С. 91–106.
- Стунжас П.А., Тищенко П.Я., Ивин В.В., Барабанщиков Ю.А., Волкова Т.И., Вышкварцев Д.И., Звалинский В.И., Михайлик Т.А., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Ходоренко Н.Д., Швецова М.Г., Головченко Ф.М. Первый случай аноксии в водах Дальневосточного морского заповедника // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467. № 2. С. 218.
- Супранович Т.И., Якунин Л.П. Гидрология залива Петра Великого // Труды ДВНИГМИ. 1976. № 22. 199 с.
- Храпченков Ф.Ф., Дулова Н.М., Горин И.И., Сергеев А.Ф. Долговременные измерения течений и температуры воды в заливе Петра Великого в 2004–2007 гг. В кн.: Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. М.: Геос, 2008. С. 9–56.

- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137. No. 656. P. 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.
- Dohan K., Maximenko N.* Monitoring ocean currents with satellite sensors // Oceanography. 2010. Vol. 23. No. 4. P. 94–103. DOI: 10.5670/oceanog.2010.08.
- Fayman P., Ostrovskii A., Lobanov V., Park J.-H., Park Y.-G., Sergeev A.* Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter // Ocean Dynamics. 2019. Vol. 69. No. 4. P. 443–462.
- Gu H., Zong Z., Hung K.C.* A modified superconvergent patch recovery method and its application to large deformation problems // Finite Elements in Analysis and Design. 2004. Vol. 40. No. 5–6. P. 665–687.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L.* NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bulletin of the American Meteorological Society. 2002. Vol. 83. No. 11. P. 1631–1644. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Khoi A.R., Gharehbaghi S.A.* The superconvergence patch recovery technique and data transfer operators in 3D plasticity problems // Finite Elements in Analysis and Design. 2007. Vol. 43. No. 8. P. 630–648.
- Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Ratner Y.B.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Science. 2011. Vol. 7. P. 629–649. DOI: 10.5194/os-7-629-2011.
- Kosheleva A.V., Lazaryuk A.Yu., Yaroshchuk I.O.* Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone // Proc. of Meeting on Acoustics. 2015. Vol. 24. 005001. DOI: 10.1121/2.0000109.
- Lebedev S.A., Kravchenko P.N.* The Complex Monitoring System of the Black Sea Marine Environment State // Post-Soviet Issues. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 269–278.
- Petersen G.N.* Meteorological buoy measurements in the Iceland Sea, 2007–2009 // Earth System Science Data. 2017. Vol. 9. P. 779–789. DOI: 10.5194/essd-9-779-2017.
- Rapizo H., Babanin A.V., Schulz E., Hemer M.A., Durrant T.H.* Observation of wind-waves from a moored buoy in the Southern Ocean // Ocean Dynamics. 2015. Vol. 65. No. 9–10. P. 1275–1288. DOI: 10.1007/s10236-015-0873-3.
- Villas Bôas A.B., Ardhuin F., Alex A. et al.* Integrated observations of global surface winds, currents, and waves: requirements and challenges for the next decade // Frontiers in Marine Science. 2019. Vol. 6. Article 425. DOI: 10.3389/fmars.2019.00425.

**THE RESULTS OF HYDROMETEOROLOGICAL MEASUREMENTS
BY THE WAVESCAN BUOY SYSTEM ON THE SOUTHWESTERN SHELF
OF THE PETER THE GREAT BAY IN 2016**

**Lobanov V.B., Lazaryuk A.Yu., Ponomarev V.I., Sergeev A.F., Kustova E.V.,
Marina E.N., Starjinskii S.S., Kharlamov P.O., Shkorba S.P., Voronin A.A.,
Gorin I.I., Zverev S.A., Kalinchuk V.V., Kosyanenko A.A., Kraynikov G.A.,
Rudykh Y.N., Semkin P.Yu., Sukhoveev E.N., Scherbinin P.E.**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Russian Academy of Sciences,
43 Baltic St., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: pvi711@yandex.ru
Submitted 20.08.2020, accepted 26.11.2020.*

For the first time, the long-term measurements of meteorological and oceanographic characteristics were measured using the anchored autonomous complex of the WaveScan buoy on the Southwestern shelf of the Peter the Great Bay (Japan Sea) from 21 April to 23 December 2016. The buoy anchor was set at 50 m depth. During 10 minutes of each hour, meteorological characteristics of the near surface layer of the atmosphere, sea water temperature at the horizon of 1.5 m, and vertical profiles of the current velocity vector from the near-surface layer to the near-bottom one were measured with resolution 4 m. During 20 minutes of each hour, the characteristics of waves on the sea surface were measured. In General, most of the meteorological characteristics measured on the buoy are in good agreement with the data of the NCEP-DOE AMIP-II, ERA-Interim and ERA5 reanalysis. The significant wave height for the whole frequency belt, mean wave period and mean spectral direction from the WaveScan Buoy measurements have the best statistical relationship, confidence level is 99%, with the correspondent significant height of the waves, mean wave period and mean spectral wave direction from reanalysis ERA5. The features of variability of vertical profiles of the current velocity vector on the synoptic and seasonal time scales that depend on wind speed and vertical stratification of density are determined. In the warm season the a significant left turn of the vector of the measured current velocity with depth is observed in the seasonal pycnocline below the surface layer of friction. At wind speed, not exceeding 5 m/s, the angle of the current velocity vector left turn reaches 170° in the bottom layer, where countercurrent is formed. During the passage of the Lionrock tropical cyclone, when and the daily mean wind velocity increase to 9 m/s, the angle of left turn of the current velocity vector in the pycnocline decreases to 20°. In the cold season a classic right turn of the current velocity vector is observed in the upper boundary layer, and the vertically average velocity vector within the 50 m layer, as well as the total drift flow in the Ekman friction layer, deviate 90° to the right from the surface wind velocity vector. The left turn of the current velocity vector at the buoy installation point was not observed in the cold season.

Keywords: southwestern shelf of the Peter the Great Bay, Japan Sea, WaveScan buoy, measurements, variability, wind waves, swell, vertical current velocity profile, meteorological characteristics, comparison, reanalysis ERA-Interim and ERA5

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state budget theme No. 5 of the POI FEB RAS «Investigation of the main processes determining the state and variability of the oceanological characteristics of the Far Eastern seas and the northwestern part of the Pacific Ocean» (0271-2016-0005, registration number

AAAA-A17-117030110042-2), and also grant No. 18-I-010 of the priority program of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences «Far East». The authors are grateful to the staff of the POI FEB RAS A.N. Drog, A.E. Subote and V.K. Fischenko for organizing the operational transmission, visualization and storage of data, as well as for the employees of the Southern District of the Far Eastern Marine Reserve and the operational unit of the Border Directorate of the FSB of Russia for the Primorsky Territory for assistance in taking measurements.

References

- Dee, D.P., S.M. Uppala, and A.J. Simmons et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, Vol. 137, No. 656, pp. 553–597.
- Dohan, K. and N. Maximenko. Monitoring ocean currents with satellite sensors. *Oceanography*, 2010, Vol. 23, No. 4, pp. 94–103.
- Dubina, V.A., P.A. Fayman, and V.I. Ponomarev. Vikhrevaya struktura techeniy v zalive Petra Velikogo (Vortex structure of currents in Peter the Great Bay). *Izvestiya TINRO*, 2013, Vol. 173, pp. 247–258.
- Fayman, P., A. Ostrovskii, V. Lobanov, J.-H. Park, Y.-G. Park, and A. Sergeev. Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter. *Ocean Dynamics*, 2019, Vol. 69, No. 4, pp. 443–462.
- Grigor'yeva, N.I. and A.V. Kucheryavenko. Kratkaya gidrologicheskaya kharakteristika zaliva Pos'yeta (Brief hydrological characteristics of the Posiet Bay). Vladivostok: TINRO; Tsentr, 1995, 95 p., Dep. v VINITI 21.08.95, No. 2466 – B9535.
- Grigor'yeva, N.I., D.I. Vyshkvartsev, A.V. Kucheryavenko, and A.V. Novozhilov. Teleniya v melkovodnykh bukhtakh zaliva Pos'yeta (Currents in shallow bays of Posiet Bay). Vladivostok: Institut biologii morya DVO RAN, 1996, 24 p., Dep. v VINITI 21.01.97, No. 156-B97.
- Grigor'yeva, N.I. and A.V. Kucheryavenko. Gidrologicheskiye usloviya yugo-zapadnoy chasti zal. Petra Velikogo (Hydrological conditions of the southwestern part of Peter the Great bay). *Izvestiya TINRO*, 2002, Vol. 131, pp. 78–95.
- Gu H., Z. Zong, and K.C. Hung. A modified superconvergent patch recovery method and its application to large deformation problems. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2004, Vol. 40, No. 5–6, pp. 665–687.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, Vol. 146, No. 730, pp. 1999–2049.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino, and G.L. Potter. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, Vol. 83, No. 11, pp. 1631–1644.
- Khoei, A.R. and S.A. Gharehbaghi. The superconvergence patch recovery technique and data transfer operators in 3D plasticity problems. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2007, Vol. 43, No. 8, pp. 630–648.
- Khrapchenkov, F.F., N.M. Dulova, I.I. Gorin, and A.F. Sergeev. Dolgovremennyye izmereniya techeniy i temperatury vody v zalive Petra Velikogo v 2004–2007 gg. (Long-term measurements of currents and water temperature in the Peter the Great Bay in 2004–2007). *Sovremennoye sostoyaniye i tendentsii izmeneniya prirodnoy sredy zaliva Petra Velikogo Yaponskogo moray*, 2008, pp. 9–56.

- Korotaev, G.K., T. Oguz, V.L. Dorofeev, S.G. Demyshev, A.I. Kubryakov, and Y.B. Ratner. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science*, 2011, Vol. 7, pp. 629–649, doi: 10.5194/os-7-629-2011.
- Kosheleva, A.V., A.Yu. Lazaryuk, and I.O. Yaroshchuk. Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone. *Proc. of Meetings on Acoustics*, 2015, Vol. 24, pp. 005001.
- Kosheleva, A.V., A.Yu. Lazaryuk, I.O. Yaroshchuk, R.A. Korotchenko, O.E. Gulin, A.N. Samchenko, A.A. Pivovarov, and A.N. Shvyrev. Akustiko-oceanologicheskoye modelirovaniye gidrofizicheskikh parametrov morskoy vody po izmereniyam temperatury v shel'fovoy zone Yaponskogo moraya (Acoustic-oceanological modeling of hydrophysical parameters of sea water from temperature measurements in the shelf zone of the Sea of Japan). *Vestnik DVO RAN*, 2018, No. 1, pp. 25–30.
- Ladychenko, S.Yu. and V.B. Lobanov. Sinopticheskie vikhri v payone zaliva Petra Velikogo po Sputnikovym dannym (Mesoscale eddies in the area of the Peter the Great Bay by using satellite data). *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 3–15.
- Lazaryuk, A.Yu., V.B. Lobanov, and V.I. Ponomarev. Evolutsiya strukturi vod Amurskogo zaliva podo l'dom (Evolution of the structure of the waters of the Amur Bay under the ice). *Vestnik DVO RAN (Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences)*, 2013, No. 6, pp. 59–70.
- Lebedev, S.A. and P.N. Kravchenko. The Complex Monitoring System of the Black Sea Marine Environment State. Post-Soviet Issues, 2019, Vol. 6, No. 3, pp. 269–278.
- Mel'nichenko, N.A., A.V. Tyuveev, A.Yu. Lazaryuk, V.E. Savchenko, and E.V. Kustova. Vertikalnoe raspredeleniye rassola i ob'emnaya struktura tonkogo odnoletnego l'da Amurskogo zaliva po dannym metodov yadernogo magnitnogo rezonansa i magnitno-rezonansnoi tomografii (Vertical distribution of brine and volume structure of thin first-year ice in the Amur Bay based on data from NMR and MRT methods). *Okeanologiya (Oceanology)*, 2019, Vol. 59, No. 5, pp. 859–869.
- Morozov, A.N., A.G. Zatsepin, S.B. Kuklev, A.G. Ostrovskii, and S.V. Fedorov. Вертикальная структура течений в верхней части континентального склона Черного моря в районе Геленджика (Vertical Structure of the Currents in Upper Part of the Black Sea Continental Slope Near Gelendzhik City). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 2017, Vol. 53, No. 6, pp. 718–727.
- Ponomarev, V.I., P.A. Fayman, V.A. Dubina, and I.V. Mashkina. Osobennosti dinamiki vod sinopticheskogo i subsinopticheskogo masshtabov nad kontinental'nym sklonom Yaponskoy kotloviny i shel'fom Primor'ya (Features of the synoptic and sub-synoptic scale sea water dynamics over continental slope of the Japan basin and Primorye shelf). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 155–165.
- Prants, S.V., V.I. Ponomarev, M.V. Budyansky, M.Y. Uleysky, and P.A. Fayman. Lagrangian analysis of mixing and transport of water masses in the marine bays. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, pp. 82–96.
- Petersen, G.N. Meteorological buoy measurements in the Iceland Sea, 2007–2009. *Earth System Science Data*, 2017, Vol. 9, pp. 779–789.
- Rapizo, H., A.V. Babanin, E. Schulz, M.A. Hemer, and T.H. Durrant. Observation of wind-waves from a moored buoy in the Southern Ocean. *Ocean Dynamics*, 2015, Vol. 65, No. 9–10, pp. 1275–1288.
- Supranovich, T.I. and L.P. Yakunin. Gidrologiya zaliva Petra Velikogo (Hydrology of the Peter-the-Great Gulf). *Trudy DVNIGMI*, 1976, No. 22, 199 p.

- Stunzhas, P.A., P.Y. Tishchenko, Y.A. Barabanshchikov, T.I. Volkova, V.I. Zvalinskii, T.A. Mikhailik, P.J. Semkin, P.P. Tishchenko, N.D. Khodorenko, M.G. Shvetsova, V.V. Ivin, D.I. Vyshkvartsev, and F.M. Golovchenko.* The first case of anoxia in waters of the Far East Marine Biosphere Reserve. *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 467, No. 1, С. 295–298.
- Villas Bôas, A.B., F. Arduin, and A. Alex et al.* Integrated observations of global surface winds, currents, and waves: requirements and challenges for the next decade. *Frontiers in Marine Science*, 2019, Vol. 6, Article 425.
- Vinokurova, T.T.* O sezonnoj i kratkoperiodnoj izmenchivosti gidrologicheskikh harakteristik v zalive Petra Velikogo (Seasonal and short-term variability of hydrological characteristics of Peter the Great Bay). *Izvestiya TINRO*, 1977, Vol. 101, pp. 7–12.
- Vinokurova, T.T. and N.M. Skoklenyova.* Vremennaya izmenchivost' okeanograficheskikh uslovij v zalive Pos'yeta (Temporal variability of Oceanographic conditions in the Bay of POS'eta). *Izvestiya TINRO*, 1980, Vol. 104, pp. 29–35.