

УДК 551.581

## РЕЖИМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ ПОПУТНЫХ СУДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

© 2016 г. В. Г. Григорьева, С. И. Бадулин

*Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва*

*e-mail: vika@sail.msk.ru, badulin@ioran.ru*

Поступила в редакцию 03.06.2015 г.

Представлен совместный анализ данных попутных судовых наблюдений и спутниковой альтиметрии как естественный первый шаг синтеза различных источников информации при построении глобальных распределений основных характеристик ветрового волнения. Поля значимых высот волн, доминантных периодов и скоростей приводного ветра, полученные с использованием различных методик и эмпирических параметризаций, демонстрируют хорошее качественное и количественное соответствие, прежде всего, на акваториях с высокой пространственно-временной плотностью данных. Обозначены основные направления работы в контексте различных исследовательских и прикладных задач, в частности, развития климатологии волнения, задач безопасности морской деятельности.

DOI: 10.7868/S0030157416010044

### ВВЕДЕНИЕ

Существующие информационные базы данных по ветровому волнению Мирового океана составляют основу климатических исследований, морских прогнозов и обеспечения безопасности морской деятельности. Эти данные демонстрируют очень широкий диапазон экспериментальных подходов и методов обработки, а, следовательно, и самого качества информации. Так, визуальные наблюдения над волнением дают наиболее продолжительные по времени ряды при относительно невысокой точности и крайне неравномерном пространственно-временном распределении измерений [2, 14]. В то же время данные спутниковой альтиметрии, обеспечивающие хорошую точность при однородном покрытии всего Мирового океана, стали доступны лишь в последние 30 лет. При этом корректная обработка и интерпретация таких данных связана с дополнительными проблемами, общими для большинства дистанционных методов измерений [5].

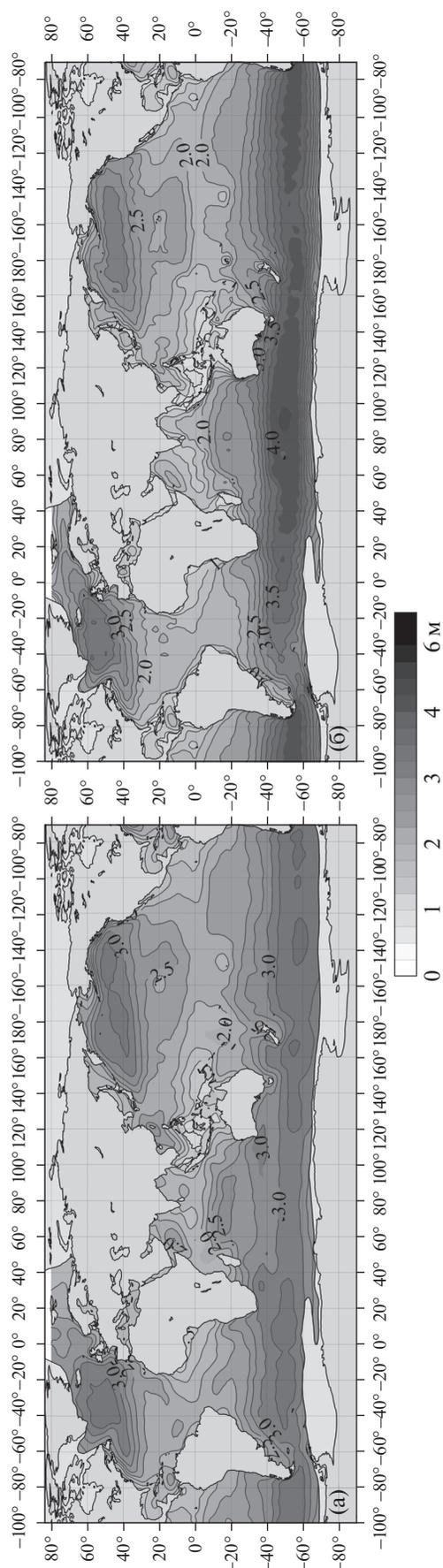
Объединение (синтез) различных видов данных для решения широкого круга исследовательских и прикладных задач требует большой работы по их сравнению, дополнительной верификации и выработке критериев достоверности конечных научно-информационных продуктов. В настоящей работе представлен совместный анализ данных попутных судовых наблюдений и спутниковой альтиметрии как наиболее масштабных глобальных массивов по ветровому волнению. Возможность и перспективность синтеза этих

двух существенно различных источников данных в задачах оценки глобальных распределений параметров волнения (например, климатологии волн) показана в сравнении режимных характеристик ветрового волнения, построенных с использованием разных подходов.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ О ВЕТРОВОМ ВОЛНЕНИИ

Попутные судовые наблюдения над волнением выполняются визуально, в соответствии с едиными международными правилами, как профессиональными океанологами, так и штурманским составом судов. Мировая коллекция визуальных морских наблюдений (Voluntary Observing Ship, далее везде VOS) ассимилирована в архив ICOADS (International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set, <http://icoads.noaa.gov/>) [26], который охватывает период с 1662 г. до настоящего времени. Относительно невысокая точность визуальных данных компенсируется их количеством (более 100000 наблюдений в месяц за последние 50 лет) и появлением новых методов контроля и обработки волновой информации [2, 14].

Для оптимальной работы на основе архива ICOADS была создана специализированная База Данных Ветрового Волнения Мирового океана [3], которая состоит из массива срочных наблюдений и содержит около ста элементов, характеризующих состояние океана в данной точке в данный момент времени, а также сведения о методах изме-



рения и их точности (так называемые “флаги качества”). Точности кодирования индивидуальных визуальных наблюдений составляют 0.5 м для высот волн и 1 с для периодов.

Данные спутниковой альтиметрии появились сравнительно недавно — с 1985 г. и довольно быстро стали важным источником сведений о ветровом волнении. Уже сейчас объем накопленной информации превышает объем всех остальных массивов данных о волнении. Только одна миссия спутника Envisat (2002–2012 гг.) обеспечивает около миллиона записей в месяц с однородным пространственно-временным покрытием всего Мирового океана. Стандартное осреднение бортовых альтиметров на масштабах нескольких километров оказывается адекватным сегодняшним целям и методам исследования и прогноза ветровых волн и зыби. Понимание этого обстоятельства послужило одним из стимулов запуску проекта Европейского космического агентства GlobWave (<http://www.globwave.org>), существенную часть которого составила работа именно с данными спутниковой альтиметрии (наряду с другими видами спутниковой информации, например, радаров с синтезированной апертурой). В рамках этого проекта, в частности, была создана специальная база альтиметрических данных. Каждая запись в этой базе содержит более 40 параметров, относящихся к измерениям морского волнения. Доступ к данным открыт, что позволяет использовать их для решения разнообразных исследовательских задач, включая те, где традиционно доминируют описанные выше попутные судовые наблюдения.

### ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ВИЗУАЛЬНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Визуальные наблюдения за волнами с 1950 г. обеспечивают независимые данные о высотах ветровых волн и зыби. Это является существенным отличием от контактных или дистанционных измерений, не проводящих такого разделения и оперирующих значимой высотой волнения (SWH) как основной количественной характеристикой поля ветрового волнения. Значимая высота волны определяется как средняя высота 1/3 наибольших волн или в терминах спектральных моментов  $SWH = 4.005\sqrt{m_0}$ , где  $m_0$  — нулевой спектральный момент, равный дисперсии возвышений морской поверхности.

На практике используются два основных способа определения значимой высоты волны по визуальным наблюдениям в случае смешанного

← **Рис. 1.** Среднегодовые поля значимых высот волн (м) по данным попутных судовых наблюдений (а) и данным альтиметрии (б), 2002–2012 гг.

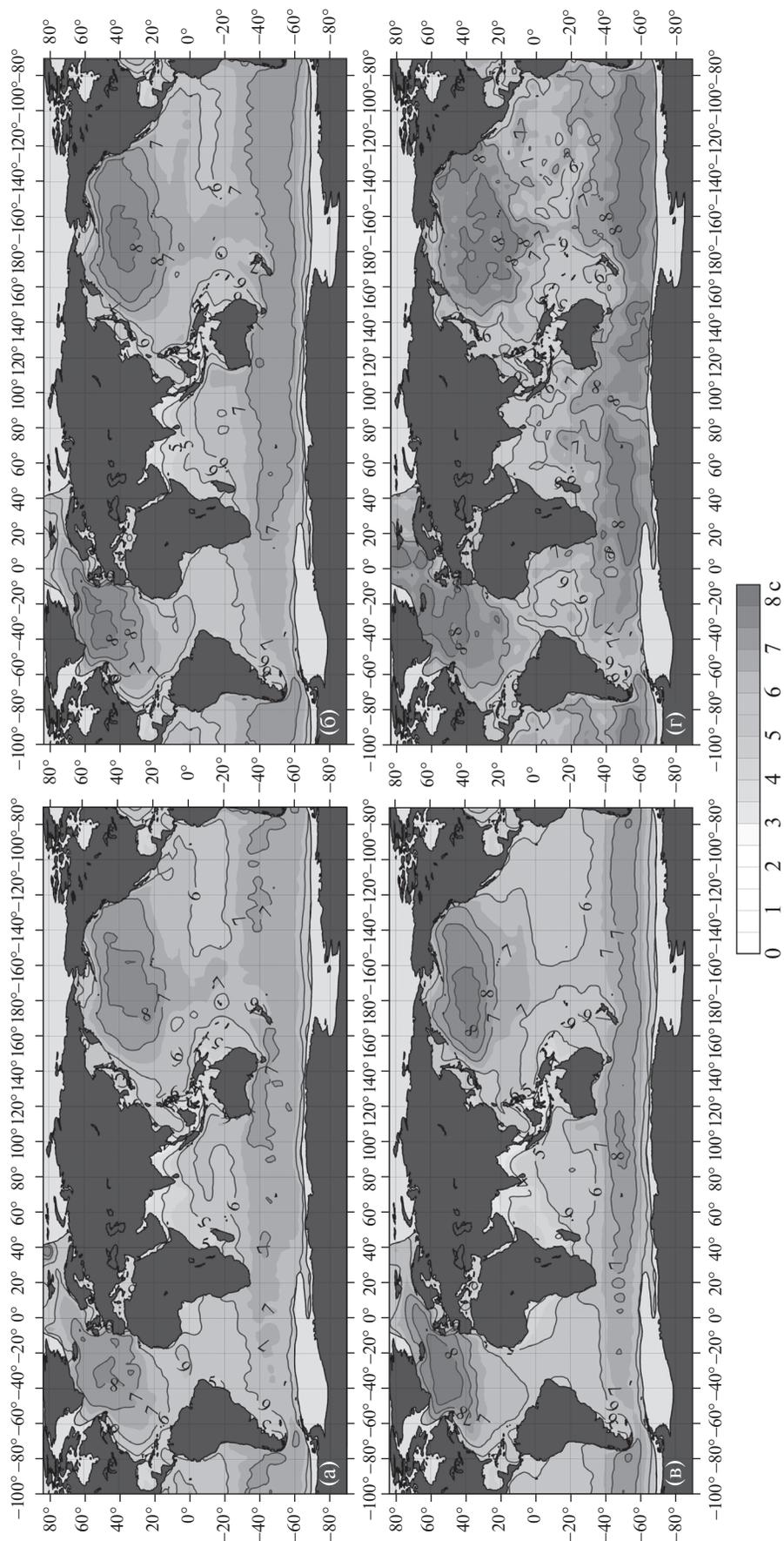


Рис. 2. Среднемесячные поля периодов волн (с) по данным альтиметрии, рассчитанные по наиболее распространенным эмпирическим формулам, предложенным в работах [22] (а), [21] (б), [13] (в), и по данным попутных судовых наблюдений (г) на примере января 2002–2012 гг.

волнения [1]. Традиционно SWH рассчитывается как квадратичная комбинация высот ветровых волн и зыби [1, 17]:

$$SWH = (h_w^2 + h_s^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $h_w$  и  $h_s$  — высоты ветровых волн и зыби соответственно. Эта формула является теоретически обоснованной с точки зрения оценивания спектральных моментов.

Альтернативной (а до 1950 г. и единственной в коллекции VOS) оценкой значимой высоты волн является наибольшая из высот, одновременно наблюдаемых: ветровой волны или волны зыби [1, 24]:

$$SWH = \max[h_w, h_s]. \quad (2)$$

В дополнение к классическим определениям часто используют комбинированный метод [8, 15, 16]. Этот подход, ставший наиболее распространенным в волновой инженерной практике, предполагает использование формулы (1), когда ветровые волны и зыбь распространяются в пределах 30-градусного сектора, и формулы (2) во всех других случаях.

Для сравнения с данными спутниковой альтиметрии были получены оценки значимой высоты волн на основе применения всех трех методов — теоретически обоснованной формулы (1), эмпирического метода (2) и комбинированного метода, далее SWH1, SWH2 и SWH3 соответственно.

Скорости ветра в визуальных наблюдениях над волнением представлены широким спектром оценок: от баллов по шкале Бофорта до классических измерений анемометров. Поэтому перед сравнением с данными альтиметрии была проведена унификация: все оценки скорости ветра по шкале Бофорта были пересчитаны из старого кода WMO1100 [25] в эквивалентную шкалу Линдау [20]. Анемометрические наблюдения были приведены к единому уровню наблюдений на основе использования технического документа WMO47 “International list of selected, supplementary and auxiliary ships”.

Период значимых высот волн определяется в рамках визуальных наблюдений как период, ассоциированный с наибольшей высотой волны — будь то ветровая волна или зыбь, что соответствует определению “zero-up-crossing period” в инструментальных данных [23].

## ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ АЛЬТИМЕТРИИ

Спутниковые альтиметры оперируют с отраженным от морской поверхности электромагнитным импульсом. Значимая высота волны рассчитывается по форме импульса принятого сигнала, осредненного вдоль трека спутника [4, 9]. Точность измерения высот волн приближается к 10 см, что является недостижимой величиной для большинства современных экспериментальных методов.

Для оценки скорости приповерхностного ветра используется сечение обратного рассеяния  $\sigma_0$  на длине несущей волны около 2.8 см (Ku-диапазон) или 5.6 см (C-диапазон). Введенный в 2013 г. перспективный альтиметр SARAL/AltiKa использует Ka-диапазон и длину волны 0.8 см [19]. Расчет скорости ветра решается построением эмпирических зависимостей  $U(\sigma_0)$  по результатам калибровки спутниковых измерений (например, по данным сети волномерных буев NDBC). Важно подчеркнуть, что полученные таким образом модели [6, 10–12] зависят от длины зондирующей волны. В настоящей работе использовались данные альтиметров Ku-диапазона, прошедшие строгий контроль качества (все флаги качества “0”).

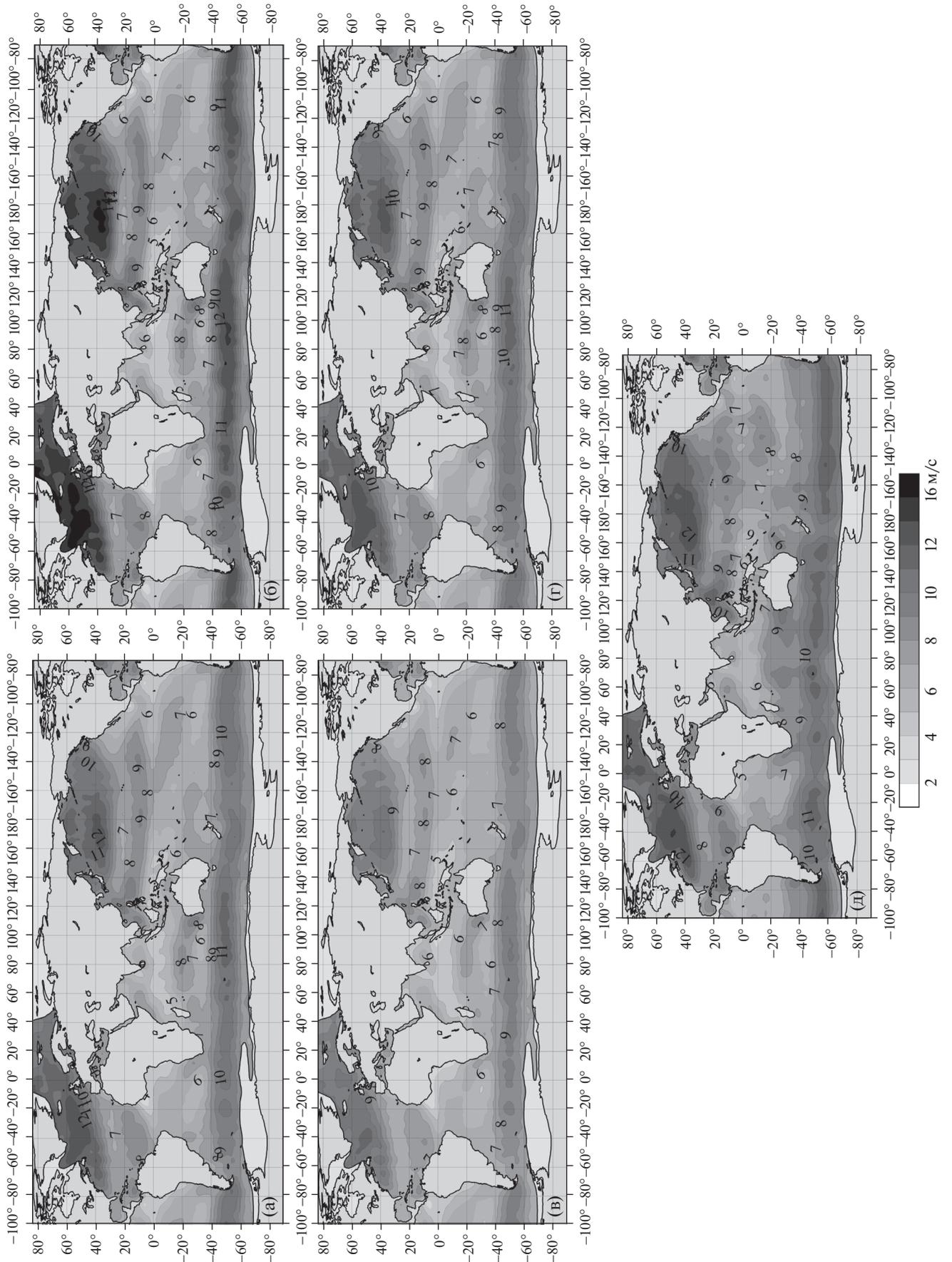
Периоды волнения ( $T$ ) рассчитывались по наиболее распространенным эмпирическим формулам [13, 21, 22]. Как и параметризации скорости ветра, зависимости  $T(SWH, \sigma_0)$  существенным образом привязаны к рабочему диапазону альтиметра. Кроме того, эмпирическая оценка волнового периода как функции двух переменных накладывает дополнительные ограничения на качество и объем исходных данных, используемых для построения параметрических зависимостей  $T(SWH, \sigma_0)$ .

## ГЛОБАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

В данной работе анализировались климатические, среднемесячные и среднегодовые поля основных волновых характеристик для современных альтиметров Ku-диапазона и VOS-данных за период 2002–2012 гг. (рис. 1, 2, 3). В статье иллюстрации приведены только для спутника Envisat.

Для построения глобальных карт параметров ветрового волнения было выбрано временное разрешение один месяц и пространственное —  $2^\circ \times 2^\circ$ . По скорректированным наблюдениям, прошедшим строгий контроль качества [2, 14], для всех волновых характеристик были рассчитаны пространственные поля за 10-летний период

Рис. 3. Среднемесячные поля скоростей ветра (м/с) по данным альтиметрии, рассчитанные по наиболее распространенным эмпирическим формулам, предложенным в работах [10] (а), [11] (б), [12] (в), [6] (г), и по данным попутных судовых наблюдений (д) на примере января 2002–2012 гг.



для каждого месяца, что позволило получить и среднегодовые режимные характеристики (рис. 1), и по климатическим месяцам отдельно (рис. 2, 3).

Все распределения волновых параметров хорошо согласованы между собой и соответствуют классической климатической картине. Режимные характеристики значимых высот волн (пример приведен для среднегодовых значений SWH1, рис. 1) представляют комбинированный эффект высот ветровых волн и зыби. Максимальные значения SWH, превышающие 4.5 м, отмечаются в среднеширотной зоне Северной Атлантики и в Южном океане. Минимальные значимые высоты волн (менее 1.5 м) наблюдаются в западных атлантических и тихоокеанских экваториальных водах и в акватории Индонезийских морей. Значимые высоты волн по визуальным наблюдениям меньше альтиметрических (до 1 м) в Полярных районах и в Южном океане за счет крайне слабой обеспеченности натурными данными. В то же время в центральной части Мирового океана SWH VOS превышают спутниковые высоты волн в среднем на 0.2 м. В целом различия по Мировому океану составляют не более 0.5 м, что меньше точности измерения высот волн в визуальных наблюдениях.

Глобальные поля альтиметрических и визуально оцениваемых периодов волнения также демонстрируют хорошую качественную и количественную согласованность (рис. 2). Январский максимум для периодов волн расположен в средних широтах Северного полушария, где его величины составляют порядка 8 с. Для Южного океана диапазон максимальных периодов варьируется от 7 до 9 с. В июле закономерно происходит возрастание периодов волн в Южном полушарии (до 9–10 с) с локальными максимумами в Индийском океане, юго-восточной части Атлантического и юго-западной части Тихого океанов (не показано).

На глобальном масштабе различия между режимными характеристиками периодов волнения составляют не более 1 с, причем к визуальным оценкам периодов наиболее близки результаты моделей [13] и [21]. Следует отметить, что высота волн – наиболее часто фиксируемый параметр в данных VOS по отношению к остальным характеристикам ветрового волнения. При этом менее частые наблюдения периодов зыби наиболее зависимы от человеческого фактора, что и обуславливает “шероховатости” глобального распределения визуальных периодов и завышение их оценок в экваториальной зоне по сравнению с альтиметрическими (рис. 2).

Скорости приводного ветра в альтиметрии, оцененные по наиболее распространенным эмпирическим зависимостям [6, 10–12], сравнивались с данными визуальных наблюдений. Все массивы показывают достоверную климатическую картину с некоторыми региональными раз-

личиями (рис. 3). С одной стороны, эти различия обусловлены изменениями в кодировании и неточностями в приведении данных к горизонту 10 м для визуальных наблюдений. С другой стороны, альтиметрическая скорость ветра рассчитывается как функция сечения обратного рассеяния  $\sigma_0$  с заявленной точностью 10% от измеряемой величины, но не лучше 1.5 м/с и только в диапазоне скоростей 5–20 м/с. Именно этим и объясняются более высокие скорости ветра в данных VOS по всему Мировому океану.

## ВЫВОДЫ

Сравнение в терминах традиционной климатологии ветрового волнения позволяет с уверенностью использовать рассмотренные массивы информации (GlobWave и VOS) для анализа режимных характеристик, оценки долгопериодных трендов и взаимной верификации характеристик волнения. Существенные расхождения проявляются только на региональных масштабах и связаны с особенностями методов измерений. В частности, эмпирические зависимости для периодов волнения в альтиметрических данных не являются универсальными и, вообще говоря, требуют дополнительной настройки для конкретных региональных условий. Серьезную конкуренцию эмпирическому подходу могут составить модели, использующие существенные физические связи между измеренными параметрами (SWH и  $\sigma_0$ ) и оцениваемой физической величиной (периодом волнения) [7, 18].

Таким образом, перспективным представляется создание на основе спутниковых и визуальных данных комбинированного Атласа ветрового волнения, в котором будет обеспечена равномерная пространственно-временная плотность данных и, соответственно, воспроизведены достоверные и более точные поля параметров волнения.

Обработка экспериментальных данных осуществлена в рамках проекта РФФИ № 14-05-00479. Проведение вычислительной части исследований, а также анализ результатов выполнены за счет гранта РНФ (проект № 14-50-00095).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 255 с.
2. Григорьева В.Г. Глобальный анализ ветрового волнения по данным попутных судовых наблюдений. Дис. на соиск. уч. ст. канд. физ-мат наук 25.00.28. Москва, 2006. 181 с.
3. Григорьева В.Г., Гулев С.К. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2011620138 “База данных Ветрового Волнения Мирового Океана”, 2011.

4. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с. ISBN 978-5-9903101-1-7.
5. 20 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium 24–29 September 2012, Venice, Italy Abstract Book. 188 p.
6. *Abdalla S.* Ku-band radar altimeter surface wind speed algorithm // Proc. of the Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007. 5 p.
7. *Badulin S.I.* A physical model of sea wave period from altimeter data // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 856–869, doi: 10.1002/2013JC009336
8. *Barratt M.J.* Waves in the North East Atlantic. UK Department of Energy Report OTI 90545, HMSO, London, 1991. 16 p.
9. *Brown G.* The average impulse response of a rough surface and its applications // *IEEE Trans. Antennas and Propagation.* 1977. V. 25. № 1. P. 67–74, doi: 10.1109/TAP.1977.1141536
10. *Carter D.J.T., Challenor P.G., Srokosz M.A.* An assessment of Geosat wave height and wind speed measurements // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № C7. P. 11383–11392, doi: 10.1029/92JC00465
11. *Chelton D.B., McCabe P.J.* A Review of Satellite Altimeter Measurement of Sea Surface Wind Speed: With a Proposed New Algorithm // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. № 3. P. 4707–4720, doi: 10.1029/JC090iC03p04707
12. *Goldhirsh J., Dobson E.* A recommended algorithm for the determination of ocean surface wind speed using a satellite-borne radar altimeter. Report JHU/APL SIR-85-U005, App. Phys. Lab., Johns Hopkins University, Laurel, MD. 1985.
13. *Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G., Cotton P.D.* Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 22. P. 2150–2155, doi: 10.1029/2003GL017743
14. *Gulev S.K., Grigorieva V., Sterl A., Woolf D.* Assessment of the reliability of wave observations from voluntary observing ships: Insights from the validation of a global wind wave climatology based on voluntary observing ship data // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C7. P. 3236–3257, doi: 10.1029/2002JC001437
15. *Gulev S.K., Hasse L.* North Atlantic wind waves and wind stress fields from voluntary observing data // *J. Phys. Oceanogr.* 1998. V. 28. P. 1107–1130.
16. *Gulev S.K., Hasse L.* Changes of wind waves in the North Atlantic over the last 30 years // *Int. J. Climatol.* 1999. V. 19. P. 1091–1117.
17. *Hogben N.* Experience from compilation of Global Wave Statistics // *Ocean Engineering.* 1988. V. 15. № 1. P. 1–31.
18. *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. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № C5. P. 10451–10468.
19. *Lillibridge J., Scharroo R., Abdalla S., Vandemark D.* One- and Two-Dimensional Wind Speed Models for Ka-band Altimetry // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2014. V. 31. P. 630–638, doi: http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00167.1
20. *Lindau R.* A new Beaufort equivalent scale // Proceedings of the International COADS Winds Workshop, Kiel, Germany, 1994 / Ed. H. Diaz, H.-J. Isemer, NOAA-ERL, IFM (Kiel). 1995. P. 232–252.
21. *Mackay E.B.L., Retzler C.H., Challenor P.G., Gommenginger C.P.* A parametric model for ocean wave period from Ku-band altimeter data // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № C03029. P. 16, doi: 10.1029/2007JC004438
22. *Quilfen Y., Chapron B., 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.
23. *Srokosz M.A., Challenor P.G.* Joint distribution of wave height and period: a critical comparison // *Ocean Engineering.* 1987. V. 14. № 4. P. 295–311, doi: 10.1016/0029-8018(87)90029-1
24. *Wilkinson J.C., Earle M.D.* A study of differences between environmental reports by ships in the voluntary observing program and measurements from NOAA buoys // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. № C3. P. 3373–3385.
25. WMO, Reports on Marine Science Affairs. Rep. No. 3: The Beaufort scale of wind force. 1970. 22 p.
26. *Woodruff S.D., Worley S.J., Lubker S.J. et al.* ICOADS Release 2.5: extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive // *Int. J. Climatol.* 2011. V. 31. № 7. P. 951–967, doi: 10.1002/joc.2103.

## Wind Wave Characteristics Based on Visual Observations and Satellite Altimetry

V. G. Grigorieva, S. I. Badulin

Joint analysis of wind wave characteristics derived from the Voluntary Observing Ship data (VOS) and satellite altimetry is presented as the first step of the synthesis of different data sources. Global distributions of significant wave heights and periods along with wind speed are constructed using various techniques and empirical parameterizations. Good qualitative and quantitative agreement of VOS and satellite altimetry is found especially for regions with high spatio-temporal density of observations. The problems and prospects of the further development of the study are discussed in the context of global wave climatology and marine safety.