

МОДИФИКАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ GLOBWAVE ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ ПОЛЯ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

© 2016 г. А. В. Гавриков, М. А. Криницкий, В. Г. Григорьева

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: gavr@sail.msk.ru, krinitsky@sail.msk.ru, vika@sail.msk.ru,

Поступила в редакцию 11.06.2015 г.

После доработки 04.08.2015 г.

Создана и апробирована многопараметрическая база данных спутниковой альтиметрии по морскому волнению на основе информационного массива проекта Европейского космического агентства GlobWave (www.globwave.org). Новая база содержит дополнительные физические параметры, обеспечивает современные средства обработки больших массивов данных и позволяет оптимизировать работу в задачах диагностики поля волнения на глобальных и региональных масштабах. Показаны особенности работы как с исходным массивом GlobWave, так и с модифицированной базой данных на примере двух спутниковых миссий: Envisat и Jason-1.

DOI: 10.7868/S0030157416020064

ВВЕДЕНИЕ

Данные спутниковой альтиметрии на сегодняшний день демонстрируют высокую точность измерения значимых высот ветровых волн (менее 5% погрешности в диапазоне от 0.5 м до 20 м) и обеспечивают глобальное равномерное покрытие Мирового океана за исключением высоких широт. Стандартное осреднение бортовых альтиметров на масштабах нескольких километров соответствует задачам и методам мониторинга состояния океана, оценки и прогноза ветровых волн и зыби [1, 2]. В 2009 году был начат международный проект Европейского космического агентства GlobWave (www.globwave.org), в рамках которого была создана специализированная база данных, включающая на сегодняшний день 9 миссий спутниковых альтиметров (GEOSAT, ERS-1/2, TOPEX/Poseidon, GFO, Envisat, Jason-1/2, CryoSAT) и охватывающая в общей сложности период с 1985 г. до настоящего времени. Достоинство массива GlobWave заключается в едином формате хранения данных и открытом доступе, что позволяет использовать их для решения широкого круга океанографических задач, связанных с морским волнением.

База данных GlobWave содержит записанные в формате NetCDF (<https://earthdata.nasa.gov/files/ESDS-RFC-022v1.pdf>) данные спутниковых альтиметров уровня L2 (Level 2) со стандартным осреднением в 1 секунду (около 7 км вдоль трека спутника) [8]. Каждый файл соответствует, как правило, 50 минутам (половина витка

спутника) измерений одной спутниковой миссии и содержит более 40 параметров, относящихся к данным о морском волнении, а также флаги качества и оценки погрешности.

При использовании данных альтиметрии в исследованиях волнового климата Мирового океана возникают характерные проблемы, связанные с анализом больших объемов информации, ее фильтрацией по ряду критериев, устранением разрывов последовательности измерений и т.п. Например, обработка исходных данных всех 9 миссий в задаче оценки глобальных климатических параметров волнения потребует перебора около 0.7 млн. файлов. Подобная структурная особенность массива GlobWave определяет неприемлемо низкую скорость обработки информации и требует сложного комплекса программного обеспечения.

При формировании новой базы ставилась цель повысить скорость работы с данными и упростить доступ к ним, прежде всего, в приложении к задачам анализа ветрового волнения на глобальных и региональных масштабах.

К прямым измерениям морского волнения альтиметрами можно отнести две величины: значимую высоту волны (sw_h) и сечение обратного рассеяния σ_0 , которые рассчитываются по форме импульса сигнала, отраженного морской поверхностью.

В массиве GlobWave дается как некалиброванная значимая высота волны, взятая из исходного массива данных AVISO, так и калиброванная – с поправками, введенными группой поддержки

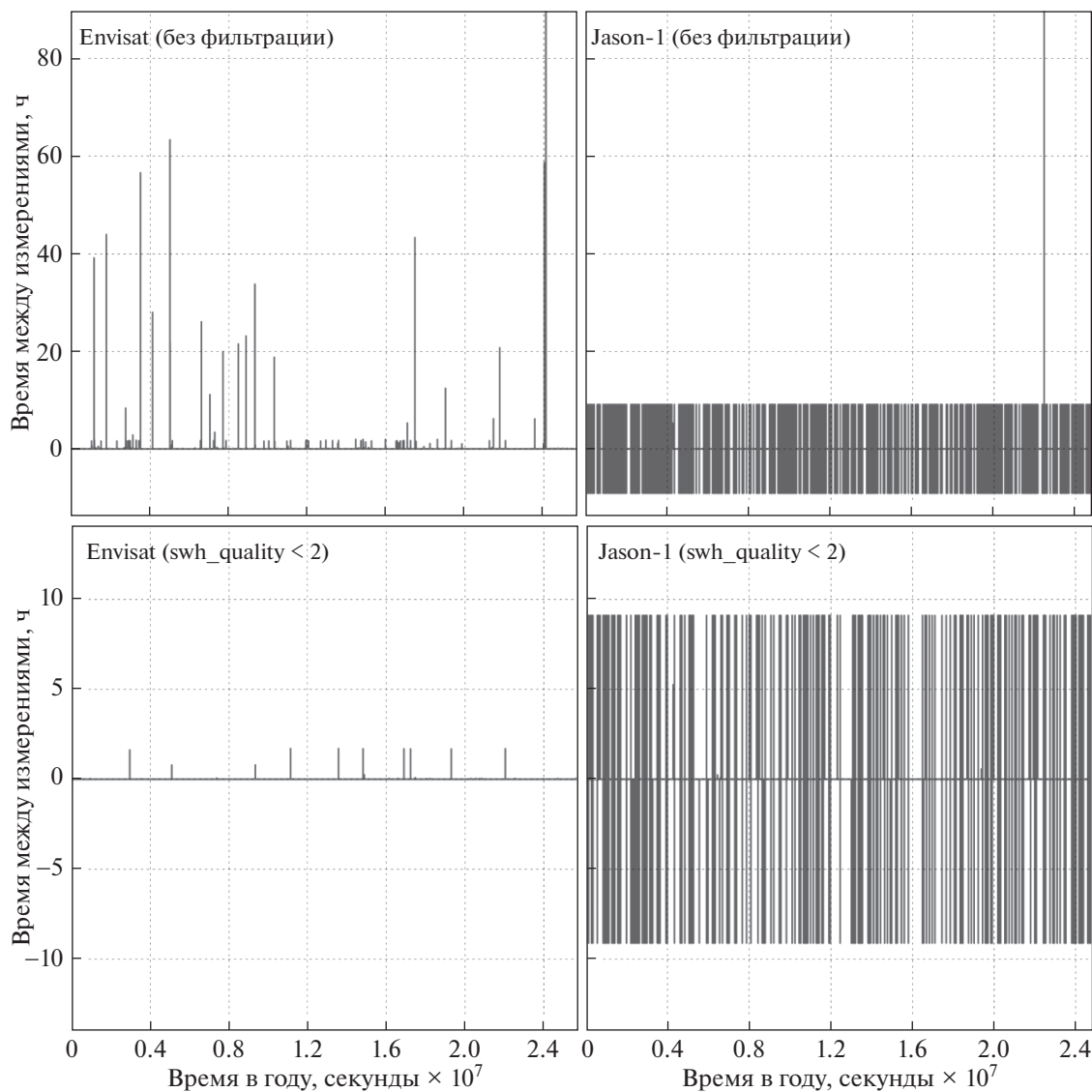


Рис. 1. Разница во времени между последовательными измерениями (параметр $dtime$) по данным Envisat (слева) и Jason-1 (справа) без фильтрации (верхняя панель) и с минимальной фильтрацией $swh_quality < 2$ (нижняя панель), 2003 г.

GlobWave на основании дополнительной верификации данных (чаще всего, по данным сети волномерных буев NDBC) [1, 5, 12]. Обычно эти поправки вводятся как функции самой swh и не превышают по величине 10 см. Скорость приповерхностного ветра, температура поверхности океана, давление, влажность и температура приводного воздуха берутся из модельных расчетов [3, 6, 7, 9, 13]. Однако для задач анализа и прогноза волнового климата океана необходимы оценки всех характеристик ветрового волнения — длин и периодов волн, крутизны и возраста волнения. Поэтому при формировании новой базы данных была поставлена цель расширения каждой записи

за счет добавления дополнительных диагностических параметров, описывающих состояние океана.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С ИСХОДНЫМИ ДАННЫМИ

Исходная информация, поступающая со спутника, не защищена от различных технических сбоев и особенностей регистрирующей аппаратуры. Некоторые возможные ошибки хорошо задокументированы или отражены во флагах качества данных, а информация о других полностью отсутствует. Рис. 1 показывает значения параметра $dtime$ (разница во времени между последовательными измерениями, секунды) для случаев с раз-

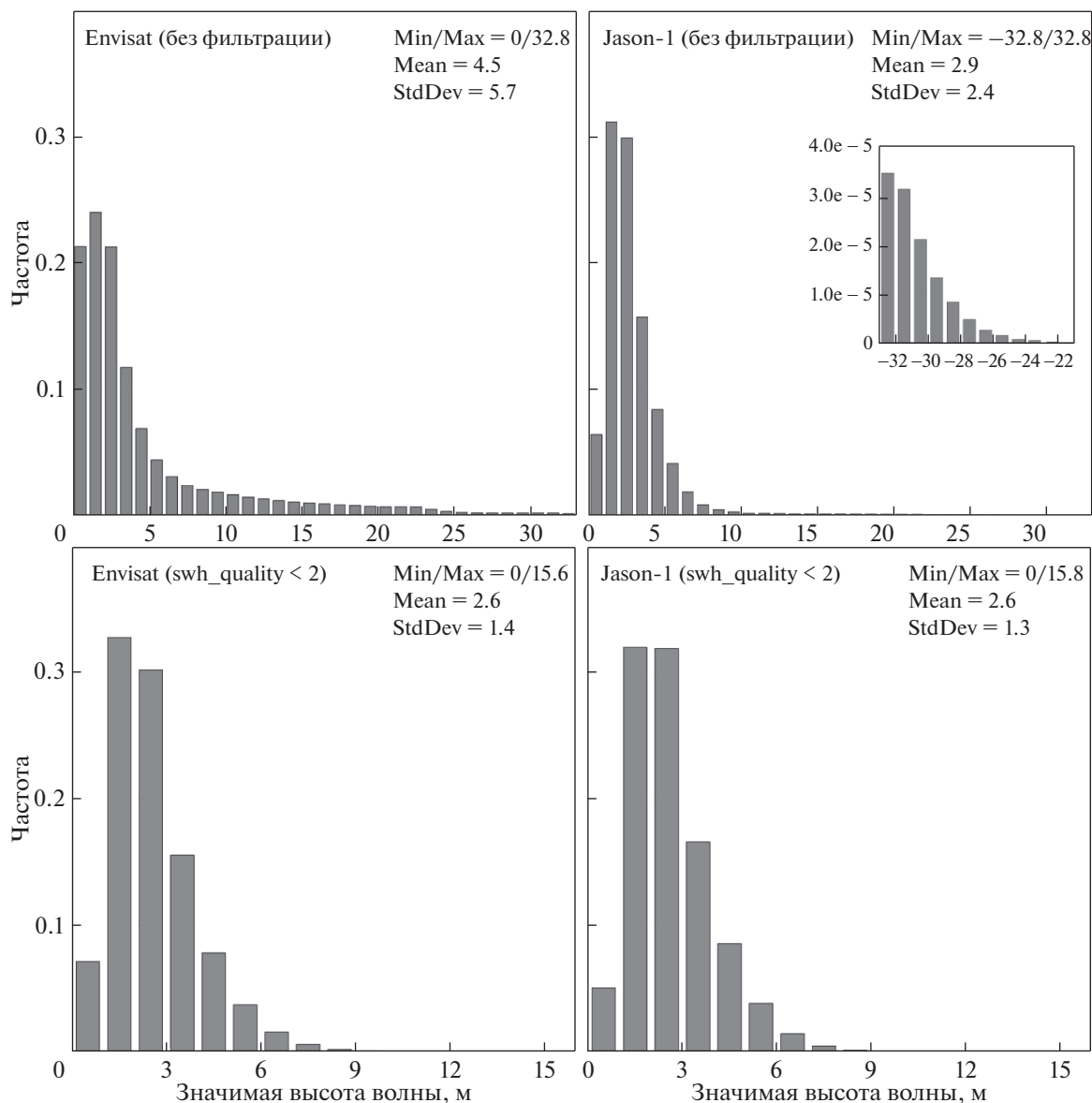


Рис. 2. Гистограммы значимых высот волн по данным Envisat (слева) и Jason-1 (справа) без применения фильтрации (верхняя панель) и с минимальной фильтрацией $swh_quality < 2$ (нижняя панель). В верхнем правом углу указаны основные статистические характеристики, 2003 г.

личной степенью фильтрации. Поскольку данные усредняются к частоте 1.01–1.1 Гц (в зависимости от миссии), в точках, где время между измерениями равно 1 с, должна проходить прямая линия. Однако взятые для примера две спутниковые миссии Envisat и Jason-1 без фильтрации данных показывают задержки между измерениями до нескольких суток (рис. 1, верхняя панель). При этом у Jason-1 задержки носят скорее систематический характер и связаны с тем, что почти каждые сутки в один и тот же момент в исходных данных происходит сбой в записи времени. Обнаруженная особенность не влияет на качество остальных параметров, рассматриваемых незави-

симо (поточечно), однако она может оказаться критической при оценке пространственных градиентов измеряемых величин.

В исходном массиве (GlobWave) предусмотрены широкие возможности фильтрации данных. Например, целочисленный параметр качества оценки значимой высоты волны $swh_quality$, принимающий значение от 0 (наиболее достоверное измерение) до 2 (вероятно недостоверное измерение), позволяет осуществлять первичный контроль информации. Если оставить записи только с наивысшим флагом качества $swh_quality = 0$, то и для параметра $dtime$ картина существенно улучшится (рис. 1, нижняя панель). Хорошо видно,

что фильтрация по флагам качества сопутствующих параметров не решает проблему с задержками по времени полностью — систематические ошибки записи времени у миссии Jason-1 и некоторые задержки у Envisat сохраняются.

Оценим качество исходных данных в GlobWave на примере наиболее важной и измеряемой напрямую характеристики — значимой высоты волны. На рис. 2 представлены гистограммы *swh* для миссии Envisat (слева) и Jason-1 (справа) без фильтрации (верхняя панель) и с минимальной фильтрацией (нижняя панель) по флагу качества *swh_quality*. Очевидно, что сырые данные непригодны к использованию, поскольку в них часто присутствуют и отрицательные значения (Jason-1, врезка на рис. 2), и экстремальные высоты волн (более 30 метров, особенно для миссии Envisat). После применения даже минимальной фильтрации ($swh_quality \leq 1$), распределения *swh* приобретают более достоверный вид. Степень необходимой фильтрации определяется конкретной задачей. Например, для валидации с волномерными буями рекомендуется применять максимально высокий флаг качества ($swh_quality = 0$). При исследовании больших волн в открытом океане во многих случаях возможно понизить степень качества до 1 или 2 (в последнем случае необходим тщательный контроль результата, см. рис. 1, рис. 2, верхние панели). Таким образом, флаг качества *swh_quality* удовлетворительно фильтрует измерения значимых высот волн, однако не решает проблему задержек по времени и, как следствие, расстояний между измерениями, а в конечном итоге, корректной оценки пространственных градиентов.

СТРУКТУРА НОВОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

При формировании модифицированной базы данных, в первую очередь, было решено отказаться от высокочастотной дискретизации файлов. Спутниковые циклы были объединены в годовые пакеты. Это привело к существенному уменьшению количества файлов, к повышению скорости доступа и удобства работы с ними, а также к сокращению числа разрывов при переходе между файлами. Чтобы обеспечить обратную совместимость и облегчить доступ потенциальных пользователей к информации, формат записи NetCDF был сохранен в неизменном виде. Несмотря на нечувствительность NetCDF к объемам данных (как формата, обеспечивающего прямой доступ к файлам), было решено исключить из GlobWave избыточную диагностическую информацию. В результате в новый массив были перенесены без изменения следующие данные: время (*time*) и координаты измерения (*lat*, *lon*); некалиброванная и калиброванная по буям значимая высота волны (*swh*) с флагом качества (*swh_quality*); коэффициент сечения обратного рассеяния (σ_0); скорость

ветра, рассчитанная по эмпирической модели [3] (*wind_speed_alt*), и расстояние до ближайшего берега (*distance_to_coast*).

Принимая во внимание, что не все данные с минимальным флагом качества ($swh_quality = 2$) являются заведомо непригодными и не все данные с максимальным флагом качества ($swh_quality = 0$) избавляют от возможных технических сбоев, было решено не фильтровать исходные значения *swh*, а добавить дополнительные параметры для контроля качества информации (*dtime* и *distance*).

Таким образом, на первом этапе модификации базы GlobWave существующие файлы были объединены в годовые ряды с сохранением базовых характеристик и удалением избыточной информации. Это привело к значительному увеличению скорости чтения данных, упростило структуру и хранение массива.

Существенной особенностью созданной базы данных стал новый блок параметров волнения. Каждая запись была дополнена расчетами скоростей приводного ветра [6, 7, 9] и периода волнения [10, 14, 15] по наиболее известным на сегодняшний день эмпирическим моделям. Крутизна волнения, рассчитанная по физической модели [4], была введена в базу в качестве дополнительного параметра, имеющего принципиальное значение для диагностики динамики поверхностного волнения. Следует подчеркнуть, что в настоящее время не существует альтернативных методов измерения этой важной физической характеристики и, следовательно, вопрос о применимости модели [4] чрезвычайно актуален. Расчет крутизны волнения требует корректного расчета производной высоты волнения вдоль трека. В связи с этим возникает упомянутая выше задача дополнительного контроля качества по параметру *dtime*. Вопросы применимости самой модели будут рассмотрены отдельно в ближайшем будущем.

Специально для оптимальной работы с базой данных был разработан комплекс программного обеспечения, позволяющий в интерактивном режиме выбирать параметры ветрового волнения для любого региона за любой период времени, устанавливать различные критерии выбора данных и оперативно визуализировать получаемые поля волновых характеристик.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ С НОВОЙ БАЗОЙ ДАННЫХ

Оценка эффективности использования новой базы данных ветрового волнения проводилась на глобальном и региональном масштабах для всех параметров, включенных в массив. На рис. 3 представлены поля значимых высот волн и диа-

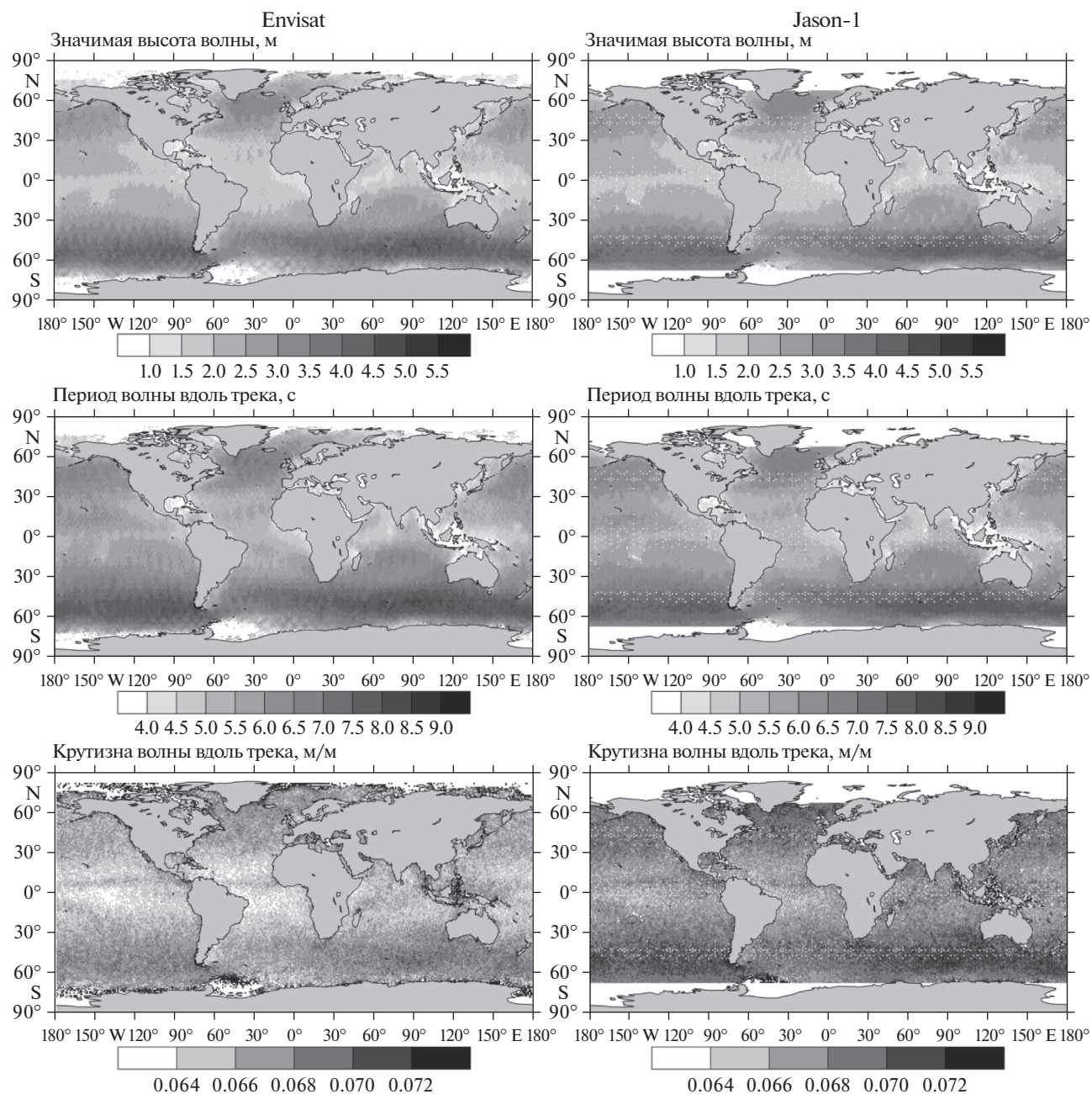


Рис. 3. Среднегодовые значимые высоты волн, периоды и крутизны волн для миссий Envisat (левая панель) и Jason-1 (правая панель). Фильтрация по $swh_quality < 2$ и $5\text{ км} < distance < 8\text{ км}$. Пример дан для 2003 г.

гностических характеристик (крутизны и периода волнения), рассчитанных по модели [4] для миссий Envisat (левая панель) и Jason-1 (правая панель) за 2003 г. В расчете диагностических параметров учитывались только данные о высоте волны с флагом качества ($swh_quality \leq 1$), при этом расстояние между измерениями ($distance$) удовлетворяло интервалу от 5 до 8 км. В этом приближении полученные глобальные распределения показывают ожидаемую климатическую картину и хорошо согласуются с данными визу-

альных наблюдений над волнением [11]. Относительно малые систематические расхождения между спутниковыми миссиями (в пределах 2% от измеренных величин) могут быть минимизированы путем интеркалибрации данных с учетом особенностей конкретной исследовательской или практической задачи.

В модифицированном массиве предусмотрена функция пополнения базы данных как за счет появления новой спутниковой информации, так и

за счет добавления новых диагностических параметров ветрового волнения. Разрабатывается программная оболочка для интерактивного доступа потенциальных пользователей с опциями выбора необходимой информации — исходные массивы данных или построенные и проанализированные поля характеристик ветрового волнения (www.sail.msk.ru/climalt).

Подготовка и 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. *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.
2. 20 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium 24–29 September 2012, Venice, Italy Abstract Book. 188 p.
3. *Abdalla S.* Ku-band radar altimeter surface wind speed algorithm // Proc. of the Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007. 5 p.
4. *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
5. *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
6. *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
7. *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
8. GlobWave/DD/PUG Issue 1.4, 16 December 2010 © 2010 Logica UK Ltd
9. *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.
10. *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
11. *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
12. *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.
13. *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>
14. *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
15. *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.

Modification of Satellite Altimetry Database GlobWave for Diagnosis of Sea Wave Fields

A. V. Gavrikov, M. A. Krinitsky, V. G. Grigorieva

A new database of ocean wave parameters was created based on satellite altimetry observations. Data from the European Space Agency project GlobWave (www.globwave.org) served as a basis which was transformed to suit the upcoming needs in global wave analysis. The database contains additional wave characteristics (altimetric wind speed estimated within different parametric models, steepness, period and some quality control parameters). It provides up-to-date tools for big data preprocessing. The new database allows to optimize wave field diagnostics on regional and global scales. The features of wave data analysis are demonstrated for Envisat and Jason-1 satellite missions as examples using both the authentic GlobWave and new databases.