

База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане

А. С. Епифанова, А. В. Рыбин, Т. Е. Моисеенко,
О. Е. Куркина, А. А. Куркин*, Д. Ю. Тюгин

*Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: aakurkin@gmail.com

Поступила в редакцию 08.02.2019 г., после доработки – 19.03.2019 г.

Цель. Целью данной работы является описание созданной общедоступной постоянно пополняемой базы данных, содержащей информацию о наблюдениях внутренних волн и литературных источниках по соответствующей тематике. Наблюдения основаны на данных, полученных путем дистанционного зондирования и прямых контактных измерений в различных акваториях Мирового океана, а также во внутриматериковых водоемах (озера, водохранилища).

Методы и результаты. Структурированы сведения из 503 литературных источников о наблюдениях внутренних волн. Рассмотрены структура, формат, объем и текущее содержание базы данных, проведен анализ хранящихся в ней сведений. Описан процесс добавления и просмотра записей с помощью веб-приложения *IGWAtlas* – онлайн-проекта для работы с базой данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане и для публичного доступа к наблюдениям и источникам, который имеет интуитивно понятный пользовательский интерфейс. Проиллюстрировано географическое распределение зарегистрированных наблюдений и показана их зависимость от времени года. Приведены примеры изображений различных типов записей, содержащихся в базе, а также их распределение по типам наблюдений. Рассмотрена в работе база данных интегрирована в программный комплекс *IGWResearch*, предназначенный для численного моделирования распространения и трансформации внутренних волн в Мировом океане.

Выводы. Создана база данных, содержащая материалы за период 1972 – 2018 гг. о 2296 зарегистрированных проявлениях внутренних волн, которым соответствуют 2465 изображений: записей устройств, спутниковых снимков, графиков, карт и таблиц. Область применения – геоинформационные системы, статистический анализ, базы знаний, веб-сервисы для задач исследования океана.

Ключевые слова: внутренние волны, база данных, Мировой океан, *IGWAtlas*, *IGWResearch*, Черное море.

Благодарности: представленные результаты получены в рамках выполнения государственных заданий (№ 5.4568.2017/6.7 и № 5.1246.2017/4.6) в сфере научной деятельности и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5. Интеграция с Базой данных внутренних волн выполнена в рамках гранта Российского научного фонда, проект № 17-71-10101.

Для цитирования: База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане / А. С. Епифанова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 395–403. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-395-403

Database of Observations of the Internal Waves in the World Ocean

A. S. Epifanova, A. V. Rybin, T. E. Moiseenko,
O. E. Kurkina, A. A. Kurkin*, D. Yu. Tyugin

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia
*e-mail: aakurkin@gmail.com

Purpose. The purpose of the paper is to describe the permanently updated public database containing the information on observations of the internal waves, as well as the scientific sources on the corresponding themes. The observations are based on the data obtained by remote sensing and direct contact measurements in various areas of the World Ocean and in the inland basins (lakes, reservoirs).

Methods and Results. The data from 503 literature sources on the observations of internal waves are structured. The structure, format, volume and current content of the database are considered; the stored information is analyzed. Described is the process of adding and viewing the records using the IGWAtlas web application (the online project for working with the database of the observations of internal waves in the oceans and for public access to observations and sources that has an intuitive user interface). Geographical distribution of the recorded observations and their dependence on a season are illustrated. The examples of images of various types of records contained in the database, as well as their distribution according to the types of observations are given. The considered in the paper database is integrated into the IGWResearch software package intended for numerical simulation of propagation and transformation of the internal waves in the World Ocean.

Conclusions. The database contains the materials for 1972–2018 on 2296 recorded manifestations of the internal waves, which correspond to 2465 images, namely device records, satellite images, graphs, maps and tables. The database scope includes geographic information systems, statistical analysis, knowledge bases, web-services for the tasks of the World Ocean research.

Keywords: internal waves, database, World Ocean, IGWAtlas, IGWResearch, Black Sea.

Acknowledgments: The represented results are obtained within the framework of realizing the state tasks (№ 5.4568.2017/6.7 and № 5.1246.2017/4.6) in the sphere of scientific activities and at financial support of the grant of the President of Russian Federation aimed at state support of scientific research of the leading scientific schools of Russian Federation ST-2685.2018.5. Integration of the database on the internal waves is performed within the framework of the Russian Scientific Foundation, project № 17-71-10101.

For citation: Epifanova, A.S., Rybin, A.V., Moiseenko, T.E., Kurkina, O.E., Kurkin A.A. and Tyugin, D.Yu., 2019. Database of observations of the internal waves in the World Ocean. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(4), pp. 350-356. doi:10.22449/1573-160X-2019-4-350-356

Введение

Внутренние волны возникают и распространяются внутри стратифицированных сплошных сред, в том числе и в водной среде вследствие ее вертикальной неоднородности по температуре и солености, а значит, и плотности. Интенсивные локализованные внутренние волны представляют интерес по многим причинам: они могут распространяться на сотни километров и осуществлять перенос и перераспределение энергии, массы, питательных веществ, загрязнений, примесей и донных материалов. Сдвиговые потоки, возникающие при их распространении, могут приводить к сильному перемешиванию и генерации областей турбулентности, внося значительный вклад в формирование рельефа дна и оказывая значительное воздействие на экосистему и подводные части гидротехнических сооружений (нефтедобывающие платформы, оградительные и причальные сооружения, судоходные шлюзы,

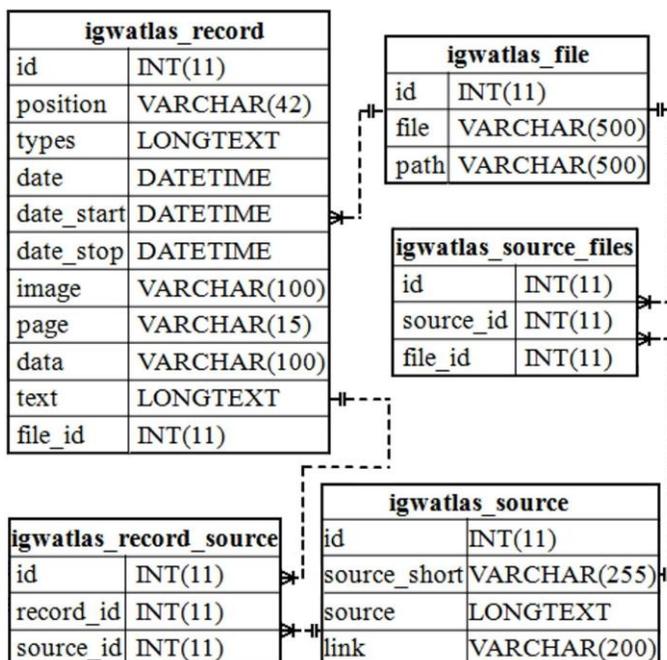
судоподъемники и пр.), что напрямую влияет на хозяйственную деятельность человека на шельфе. Все вышесказанное подтверждает тот факт, что внутренние волны являются актуальным объектом исследования.

Регистрация морских внутренних волн сопряжена с большими трудностями, поэтому, несмотря на то что она ведется с середины прошлого века, в различных акваториях зафиксировано ограниченное количество наблюдений. До сих пор существует только один каталог, содержащий спутниковые изображения внутренних волн, – Атлас океанских уединенных внутренних волн [1], изданный в 2004 г. Наибольшее количество наблюдений содержится в работах, посвященных областям океана с высокой вероятностью генерации внутренних волн, зависящей от интенсивности генерирующих факторов, таких как мощность баротропного прилива и значительные уклоны дна [2].

В настоящей работе описаны структура, формат и содержание базы данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане, полученных путем дистанционного зондирования и прямых контактных измерений в различных акваториях Мирового океана, а также во внутриматериковых водоемах (озера, водохранилища).

Структура и формат базы

База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане, имеющая объем 1,9 Гбайт, создана на основе системы управления базой данных (СУБД) *MySQL*. Это свободная реляционная СУБД, позволяющая обращаться к базе данных одновременно нескольким пользователям и централизованно хранить ее на сервере (рис. 1).



Р и с. 1. Схема базы данных внутренних волн в Мировом океане

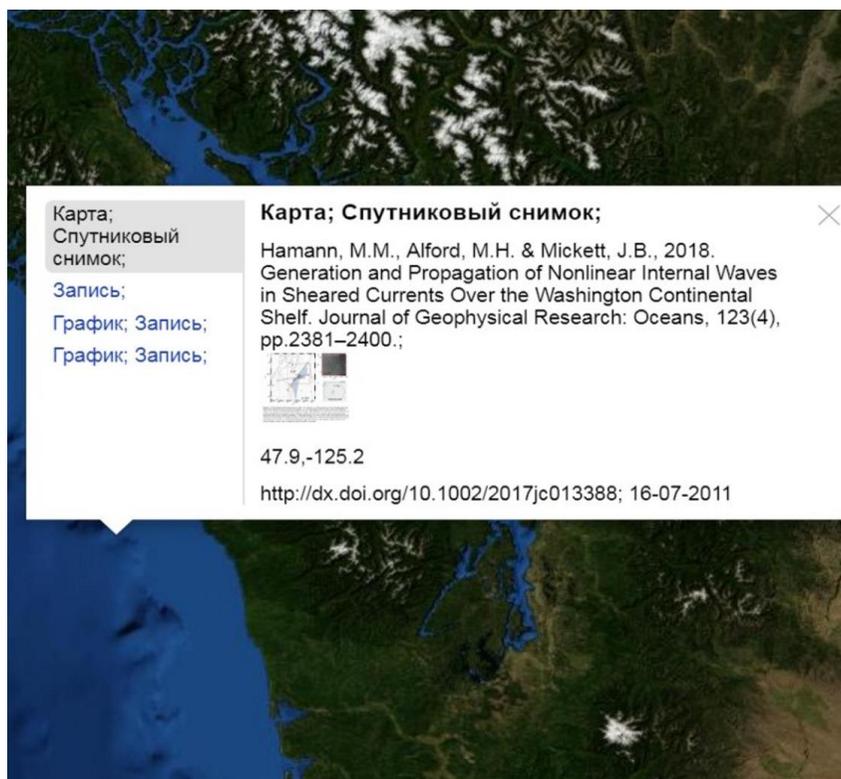
F i g. 1. Database scheme of internal waves in the World Ocean

Добавление новых записей в базу данных внутренних волн и их просмотр

База данных интегрирована в веб-приложение *Internal Gravity Waves Atlas (IGWAtlas)* (<https://Imnad.nntu.ru/igwatlas/>). Атлас внутренних гравитационных волн представляет собой онлайн-проект для работы с базой данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане и для публичного доступа к наблюдениям и источникам. Для взаимодействия пользователя с базой данных: добавления, редактирования, поиска и удаления записей – была разработана панель администратора, имеющая интуитивно понятный пользовательский интерфейс.

Добавление новой записи осуществляется следующим образом: на начальном этапе в соответствующие поля приложения *IGWAtlas* заносятся библиографические данные литературного источника, содержащие информацию о проявлениях внутренних волн в Мировом океане. Далее заносятся сведения о наблюдениях, описанных в источнике. При отсутствии координат они могут быть восстановлены по опубликованному изображению и отмечены на карте вручную.

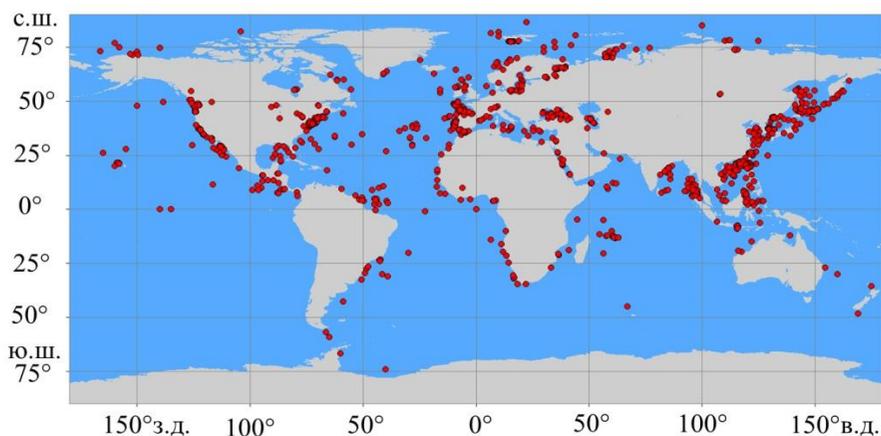
Пример веб-страницы приложения *IGWAtlas* с изображением географического расположения места регистрации внутренних волн и с указанием литературного источника, описывающего эти волны, показан на рис. 2.



Р и с. 2. Пример веб-страницы с визуализацией наблюдений внутренних волн
F i g. 2. An example of a web page with visualization of observations of internal waves

Анализ содержания базы данных внутренних волн

Созданная база данных первоначально была основана на материалах Атласа океанских уединенных внутренних волн, содержащего 275 источников и текстовое описание с графическими иллюстрациями более 300 примеров для 54 различных районов Мирового океана [1]. Они дополняются информацией из следующих источников: публикаций в ведущих российских и зарубежных реферируемых научных журналах, материалов научных семинаров и конференций, диссертационных работ, а также данными персональных коммуникаций. В настоящее время база содержит 2296 наблюдений из 503 литературных источников, охватывающих период 1972–2018 гг. Их географическое распределение показано на рис. 3.



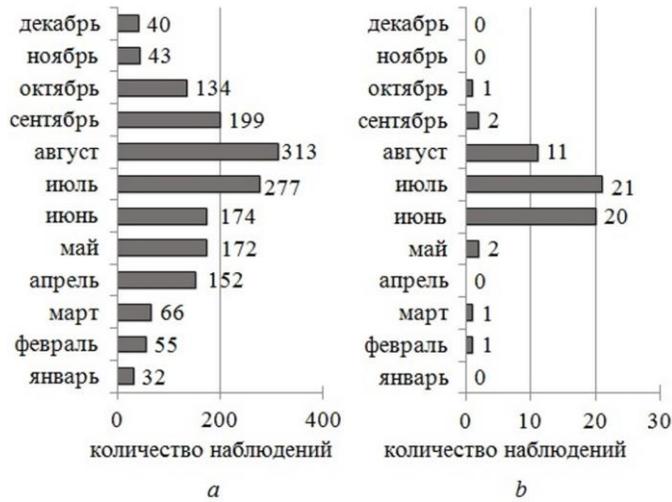
Р и с. 3. Географическое распределение зарегистрированных наблюдений внутренних волн в Мировом океане

F i g. 3. Geographical distribution of the recorded observations of internal waves in the World Ocean

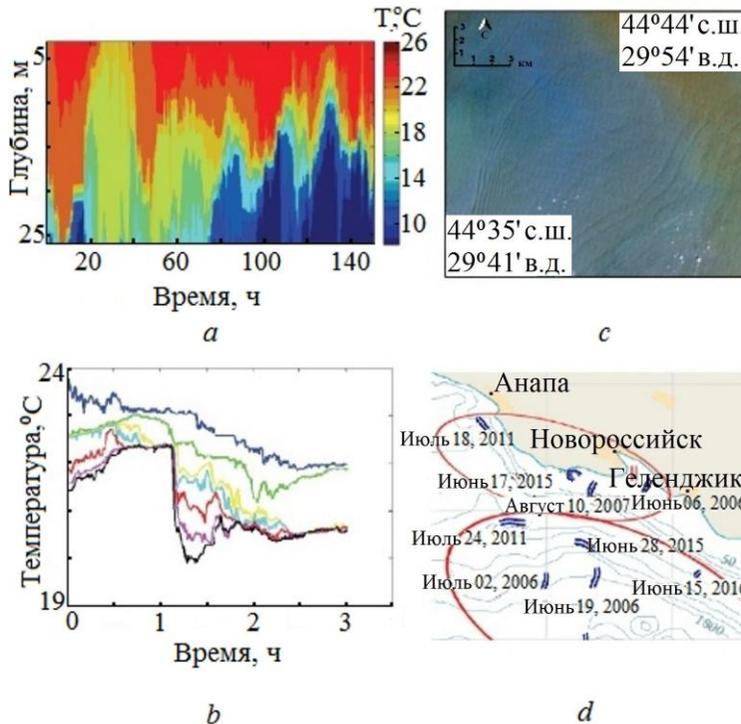
Наибольшее количество наблюдений зарегистрировано в Южно-Китайском, Желтом и Японском морях (441), на побережьях Северной Америки и Мексики (297), в Гибралтарском проливе и на Иберийском побережье (134), в Белом море (71) и в Черном море (59).

Сезонная изменчивость внутренних волн в Мировом океане имеет ярко выраженные проявления (рис. 4, *a*). Пик количества наблюдений приходится на летний период (764), минимальные значения зафиксированы зимой (127). Осенью и весной зарегистрировано соразмерное число данных (376 и 390 соответственно).

Особого внимания заслуживает Черное море. Оно богато природными ресурсами, здесь же находятся крупнейшие порты юга России и важные гидротехнические сооружения, а в прибрежной зоне размещены коммуникации международного и федерального значения. Поэтому не вызывает сомнения тот факт, что изучение волновых процессов в Черном море [3–6] имеет чрезвычайно важное экологическое, экономическое и хозяйственное значение. Сезонная изменчивость числа наблюдений внутренних волн в Черном море такова: в летний период – 52, в осенний и весенний – по 3, в зимний – 1 (рис. 4, *b*).



Р и с. 4. Сезонная изменчивость числа наблюдений внутренних волн в Мировом океане – *a* и в Черном море – *b*
F i g. 4. Seasonal variability of a number of observations of internal waves: in the World Ocean – *a*, in the Black Sea – *b*



Р и с. 5. Типы наблюдений внутренних волн: *a* – запись с устройств; *b* – график [7]; *c* – спутниковый снимок; *d* – карта [8]
F i g. 5. Types of observations of internal waves: *a* – recording from the devices; *b* – graph [7]; *c* – satellite image; *d* – map [8]

В базе данных кроме координат, даты регистрации внутренних волн и информации о литературных источниках представлены и другие сведения (типы наблюдений): записи с устройств регистрации [7, 9, 10], спутниковые снимки [8, 11], несколько типов графиков [12], рисунков и профилей параметров стратификации, карты [13–16], отображающие районы наблюдения, таблицы [17, 18] параметров внутренних волн в различных районах Мирового океана (рис. 5).

База данных организована таким образом, что каждой записи могут соответствовать несколько типов наблюдений. В базе хранится 2465 различных изображений, в том числе 59 – по Черному морю. Количественные характеристики типов наблюдений приведены на рис. 6.



Рис. 6. Распределение записей по типам наблюдений в Мировом океане – *a* и в Черном море – *b*
Fig. 6. Distribution of the records by the types of observations in the World Ocean – *a* and in the Black Sea – *b*

Практическая значимость

Созданная нами база данных интегрирована в программный комплекс *Internal Gravity Waves Research (IGWResearch)* для моделирования внутренних волн в Мировом океане. Комплекс разработан в научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексева.

В *IGWResearch* реализованы расчетные блоки и алгоритмы для работы с многомерными данными, представляющими собой физические поля, распределенные на географической сетке, алгоритмы построения и подготовки выборок данных для проведения математического моделирования, ряд численных моделей (уравнения Гарднера, Кортвега-де-Вриза, Гарднера – Островского) для моделирования и трансформации внутренних волн, алгоритмы для загрузки данных в комплекс, модель построения траектории переноса частиц, а также ряд программных инструментов для анализа и визуализации результатов.

Для инициализации численных моделей используются данные плотности, полученные из открытых источников с помощью уравнения состояния морской воды на основе гидрологических атласов *WOA13* (<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>) и *GDEM* [19]. Для задания береговой линии применяется атлас батиметрии *ETOPO1* (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>). Подробно с этим комплексом можно ознакомиться в работах [20–22].

Заключение

Создана база данных, содержащая обширные сведения о наблюдениях внутренних волн в Мировом океане и включающая в себя 2296 наблюдений из 503 литературных источников за период 1972–2018 гг. Она обеспечивает возможность быстрого поиска информации о подтвержденных случаях регистрации внутренних волн, описанных в отечественной и зарубежной литературе. База данных представляет интерес для исследователей в сфере экологии, гидробиологии, гидроинженерии, нефтедобычи. Постоянно ведутся работы по ее наполнению и совершенствованию структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jackson Ch. R.* An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties // Second Ed. Alexandria, Va, USA : Global Ocean Associates. 2004. 560 p. URL: <http://www.internalwaveatlas.com> (дата обращения: 03.02.2019).
2. *Миропольский Ю. З.* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л. : Гидрометеоиздат, 1981. 302 с.
3. *Горячкин Ю. Н.* Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 5. С 399–411. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-399-411
4. *Базыкина А. Ю., Доценко С. Ф.* Распространение поверхностных длинных волн типа цунами в бухтах переменной глубины // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 4. С. 3–12.
5. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-53-64
6. Интерпретация оптических спутниковых изображений Черного моря в зоне солнечного блика / М. В. Юровская [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 4. С 68–82.
7. *Серебряный А. Н., Химченко Е. Е.* Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 88–104.
8. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, iss. 9. 892. doi:10.3390/rs9090892
9. Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей Белого моря в августе 2013 г. / А. В. Зимин [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 1. С. 85–91.
10. Mixing and sediment resuspension associated with internal bores in a shallow bay / E. Masunaga [et al.] // Continental Shelf Research. 2015. Vol. 110. P. 85–99. doi:10.1016/j.csr.2015.09.022
11. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. / А. В. Зимин [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 41–55. doi:10.7868/S0205961414030087
12. Quad-polarization SAR features of ocean currents / V. Kudryavtsev [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014. Vol. 119, iss. 9. P. 6046–6065. doi:10.1002/2014jc010173
13. Мониторинг короткопериодных внутренних волн в Белом море / А. В. Зимин [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 51–61. doi:10.7868/S0205961415030148
14. Внутренний прилив в проливе Карские Ворота / Е. Г. Морозов [и др.] // Океанология. 2017. Т. 57, № 1. С. 13–24. doi:10.7868/S0030157417010105
15. *Kim H., Son Y. B., Jo Y.-H.* Hourly Observed Internal Waves by Geostationary Ocean Color Imagery in the East/Japan Sea // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2018. Vol. 35, no. 3. P. 609–617. doi:10.1175/jtech-d-17-0049.1

16. *Novotryasov V. V., Stepanov D. V., Yaroshchuk I. O.* Observations of internal undular bores on the Japan/East Sea shelf-coastal region // *Ocean Dynamics*. 2016. Vol. 66, iss. 1. P. 19–25. doi:10.1007/s10236-015-0905-z
17. *Зимин А. В., Родионов А. А., Жегулин Г. В.* Короткопериодные внутренние волны на шельфе Белого моря: сравнительный анализ наблюдений в различных районах // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 3. С. 19–33.
18. Analysis of kinematic parameters of Internal Solitary Waves in the Northern South China Sea / G. Liao [et al.] // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2014. Vol. 94. P. 159–172. doi:10.1016/j.dsr.2014.10.002
19. *Teague W. J., Carron M. J., Hogan P. J.* A Comparison Between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus climatologies // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1990. Vol. 95, iss. C5. P. 7167–7183. <https://doi.org/10.1029/JC095iC05p07167>
20. *Тюгин Д. Ю., Куркина О. Е., Куркин А. А.* Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в Мировом океане // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4, № 2. С. 32–44.
21. Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013 / Д. Ю. Тюгин [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 5, № 3. С. 89–95.
22. Modelling of internal waves in the Baltic Sea / E. N. Pelinovsky [et al.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 2. С. 8–20. doi:10.7868/S2073667318020016

Об авторах:

Епифанова Анастасия Сергеевна, доцент кафедры «Прикладная математика», Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1061-0964**, **ResearcherID: H-2476-2019**, pozhideva.a.s@gmail.com

Рыбин Артем Валерьевич, инженер научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5084-3610**, **ResearcherID: S-5676-2019**, arybin93@gmail.com

Моисеенко Татьяна Евгеньевна, студентка 3-го курса кафедры «Прикладная математика», Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), **ORCID ID: 0000-0003-0966-5976**, tatyana.moiseenko99@mail.ru

Куркина Оксана Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, доцент кафедры «Прикладная математика», Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4030-2906**, **ResearcherID G-9577-2011**, Oksana.Kurkina@mail.ru

Куркин Андрей Александрович, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой «Прикладная математика», научный руководитель научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0003-3828-6406**, **ResearcherID: A-1972-2014**, aakurkin@gmail.com

Тюгин Дмитрий Юрьевич, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5598-3567**, **ResearcherID: L-9810-2016**, dtyugin@gmail.com