

УДК 551.461

© Е. А. Рувинская, Д. Ю. Тюгин, О. Е. Куркина, А. А. Куркин

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Россия

aakurkin@gmail.com

ЗОНИРОВАНИЕ ПО ТИПАМ ПЛОТНОСТНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ВОД БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В КОНТЕКСТЕ ДИНАМИКИ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Статья поступила в редакцию 19.06.2017, после доработки 08.01.2018.

Проведено зонирование Балтийского моря по типу плотностной стратификации. Выделены области, где профиль плотности морской воды хорошо аппроксимируется двух- либо трехслойной моделью. Определены значения параметров слоистых моделей: глубины залегания пикноклинов, величины скачков плотности на границах раздела слоев в процентах от общего изменения плотности. Такое зонирование позволяет упростить предварительное исследование внутренних гравитационных волн в рассматриваемом регионе, фактически сводя его к использованию известных аналитических результатов для волн на границах разделов в слоистых жидкостях, и легко проводить предварительные оценки их кинематических и нелинейных характеристик. Обсуждаются изменения этих зон от зимы к лету (расчеты выполнены для характерной стратификации плотности вод в январе и июле). Гидрологические данные для расчета поля плотности взяты из базы данных обобщенной численной модели среды (Generalized Digital Environmental Model Database, GDEM), кроме того, использовались рассчитанные данные о температуре и солёности в рамках модели океана Россби центра (RCO) для Балтийского моря. Показано, что для большинства точек с близкими координатами в RCO и GDEM тип плотностной стратификации одинаков.

Ключевые слова: стратификация плотности, внутренние волны, двухслойная жидкость, трехслойная жидкость, Балтийское море.

E. A. Rouvinskaya, D. Y. Tyugin, O. E. Kurkina, A. A. Kurkin

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Russia

MAPPING OF THE BALTIC SEA BY THE TYPES OF DENSITY STRATIFICATION IN THE CONTEXT OF DYNAMICS OF INTERNAL GRAVITY WAVES

Received 19.06.2017, in final form 08.01.2018.

Zoning of the Baltic Sea was carried out according to the type of density stratification. Areas are marked out where the profile of the sea water density is well approximated by a two- or three-layer model. The values of the parameters of layered models, such as the depth of pycnoclines and the amplitude of the density jumps at the interfaces of the layers as a percentage of the total density change are determined. Such a zoning makes it possible to simplify the preliminary investigation of internal gravity waves in the considered region, effectively reducing it to the use of known analytical results for interfacial waves in layered fluid. It is also easy to carry out preliminary estimates of their kinematic and nonlinear characteristics. Variability of these zones from winter to summer is discussed. Hydrological data for calculating the density field are taken from the database of the generalized numerical model of the environment (Generalized Digital Environmental Model Database, GDEM). In addition, calculated temperature and salinity data were used within the framework of the ocean model of the Rossby Center (RCO) for the Baltic Sea. For most points with close coordinates in RCO and GDEM, the type of density stratification is the same.

Key words: density stratification, internal waves, two-layer fluid, three-layer fluid, Baltic Sea.

Ссылка для цитирования: Рувинская Е. А., Тюгин Д. Ю., Куркина О. Е., Куркин А. А. Зонирование по типам плотностной стратификации вод Балтийского моря в контексте динамики внутренних гравитационных волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 1. С. 46—51.

For citation: Rouvinskaya E. A., Tyugin D. Y., Kurkina O. E., Kurkin A. A. Mapping of the Baltic Sea by the types of density stratification in the context of dynamics of internal gravity waves. *Fundamentalnaya I Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 1, 46—51.

DOI: 10.7868/S2073667318010057

Как известно, основной механизм генерации внутренних волн в океане — взаимодействие баротропного прилива с неровностями дна. Балтийское море является бесприливным (амплитуда прилива меняется от 4 см (Клайпеда) до 10 см (Финский залив) [1]). Однако и в таких морях существуют механизмы генерации интенсивных внутренних волн. Так, например, они могут генерироваться при протекании активных динамических процессов, связанных с возникновением и релаксацией прибрежного апвеллинга, даунвеллинга, вихрями различных масштабов, сгонно-нагонными явлениями, осцилляциями гидрологических фронтов и т. п. [2]. В работах [3—6] суммированы спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн (ППВВ) в морях без приливов. Пакеты внутренних волн в Балтийском море хорошо заметны на спутниковых фотографиях, находящихся на сайте ИКИ РАН (http://iki.rssi.ru/asp/iw_images/index.html#bal-tic).

Возможность генерации и распространения интенсивных внутренних волн, а также их воздействие на рельеф дна, прибрежные и морские гидротехнические сооружения и морскую экосистему, зависит от особенностей батиметрии и стратификации плотности морской воды. Поэтому при моделировании внутренних волн важно определить гидрологические условия моря. Для этого могут быть использованы данные температуры и солёности, заданные на некоторой сетке, которые можно найти в международных океанологических атласах, таких как GDEM (Generalized Digital Environmental Model Database) и WOA (World Ocean Atlas), составленных на основе натурных измерений и содержащих сведения о долгосрочной средней стратификации плотности. На основе записей, полученных по модели циркуляции океана Россби центра (Rossby Centre Ocean, RCO) [7] за период 29.05.1961—31.05.2005 гг., в работе [8] показано существование двух пикноклинов для некоторых областей Балтийского моря. Это связано с поступлением большого количества пресной воды за счёт осадков и речного стока, и нерегулярного притока солёных вод Северного моря с глубинным течением [9]. Наличие одного или двух ярко выраженных скачков плотности позволяет использовать для исследования динамики внутренних волн хорошо разработанные слабонелинейные модели для двух- или трехслойной жидкости. Эти модели основаны на обобщениях уравнения Кортевега-де Вриза, в частности включением в него дополнительных слагаемых, связанных с кубической нелинейностью, вращением Земли и донного трения [10—14]. Этот подход активно применялся для изучения трансформации внутренних волн в океане переменной глубины, как правило, при использовании двухслойной стратификации [15—17], и показал хорошее соответствие с результатами натурных измерений. При определенном расположении скачков плотности по глубине в трехслойной жидкости могут вырождаться некоторые параметры нелинейности в слабонелинейных эволюционных уравнениях для внутренних волн [18—20]. Одна из моделей, уточняющих особенности динамики внутренних волн в этом случае, развита в работах [20, 21]. Возможные режимы распространения внутренних волн в трехслойной жидкости в зависимости от условий среды также исследованы в нашей работе [22]. Таким образом, целью настоящего исследования является зонирование фоновой стратификации Балтийского моря по признаку «слоистости». Это позволит упростить применение различных теоретических моделей для исследования интенсивных внутренних волн, а также будет способствовать повышению качества преданализа различных районов акватории на этапе подготовки численных экспериментов по генерации и распространению таких волн.

Многослойная аппроксимация. Для зонирования фоновой стратификации Балтийского моря по признаку слоистости мы используем параметрическую модель вертикального распределения плотности морской воды, которая имеет N -слойную структуру:

$$\rho(z) = \rho_0 + \sum_{m=1}^{N-1} \Delta_m \tanh \frac{z - b_m}{d_m}, \quad (1)$$

где z — вертикальная координатная ось (уровень $z = 0$ соответствует невозмущенной поверхности моря), направленная вниз; параметрами для подбора в процессе аппроксимации являются количество слоев, $N \geq 2$, а также константы: $\rho_0 = \frac{\rho_{\min} + \rho_{\max}}{2}$ — характерное значение плотности морской воды в рассматриваемой точке, Δ_m и b_m — величина и глубина m -го скачка плотности, соответственно, d_m — характерная полуширина m -го переходного слоя между m -м и $(m + 1)$ -м слоями. Схема такой «почти» слоистой модели изображена на рис. 1. Суть этого подхода состоит в том, что на вертикальном профиле плотности можно выделить квазиоднородные участки, на которых плотность остается примерно одинаковой, а между ними расположены «переходные» стратифицированные слои. Классический

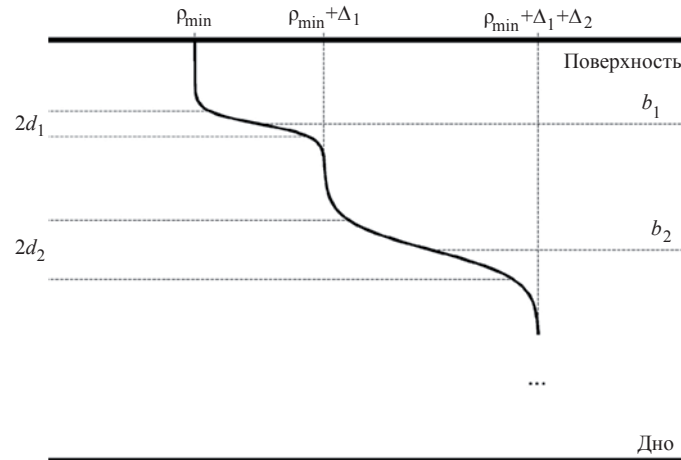


Рис. 1. Схема слоистой жидкости с тонкими переходными слоями.

Fig. 1. Scheme of a layered fluid with thin transition layers.

пример такой модели — двухслойный океан, в котором существует верхний, равномерно прогретый слой и нижний слой холодной воды, разделенные «переходным» слоем с максимальным значением вертикального градиента плотности, так называемый пикноклин. Еще одним достаточно распространенным примером может служить трехслойная модель, которая содержит три квазигомогенных слоя и два пикноклина, существование которых может быть связано с распреснением за счет притока речных вод, либо с существованием отличающихся по температуре или солености придонных течений. Выбор аналитической модели для параметризации профиля плотности связан с особенностями гидрологического режима исследуемой акватории. Так, например, для северо-восточной части Охотского моря в работе [23] была выбрана четырехслойная модель, состоящая из однородного верхнего слоя, сезонного пикноклина, представленного двумя подслоями, и глубоководной части.

В настоящей работе проведена реконструкция фонового распределения плотности с помощью двух- и трехслойных моделей для Балтийского моря.

Стандартный подход к определению коэффициентов модели состоит в минимизации среднеквадратического отклонения между модельным и реальным профилями, что делается с помощью метода наи-

меньших квадратов. Точность аппроксимации данных из атласа ($R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$, где y_i — зна-

чение плотности из атласа для заданной глубины, $\tilde{y}_i$ — модельное значение плотности для заданной глубины, $\bar{y}$ — среднее значение плотности), составляла от 0.95 до 0.99 и для большинства точек сетки лежит в интервале [0.98, 0.99].

Используемые данные. Анализировались данные о плотности морской воды из международной климатологической базы данных GDEM (Generalized Digital Environmental Model, GDEM V 3.0; <https://catalog.data.gov/dataset/global-gridded-physical-profile-data-from-the-u-s-navys-generalized-digital-environmental-model>), представляющих собой массив усредненных и сглаженных данных натурных измерений температуры, солености и других гидрологических параметров Мирового океана. Данные GDEM представлены на сетке с пространственным разрешением в 1/6 градуса географической широты/долготы. Атлас содержит для Балтийского моря 33 уровня глубины от поверхности до отметки 410 м. В качестве источника гидрологических данных также использовались результаты численных экспериментов с пространственной сеткой по горизонтали, имеющей ячейку со стороной в 2 морские мили, в рамках трехмерной гидростатической модели океана Россби Центра (RCO), которая в основном используется для Балтийского моря и Северного Ледовитого океана. В имеющихся расчетах разрешение модели по вертикали составляет 3—12 м, что удобно для более детального исследования структуры

плотности морской воды. На основании проведенных расчетов была получена хорошая согласованность результатов зонирования плотностной стратификации при использовании данных GDEM и RCO, как в смысле географического распределения точек, так и с точки зрения получаемых параметров модельных стратификаций, что позволяет сделать вывод о реалистичности полученных результатов и их независимости от источника данных.

Результаты расчетов. На рис. 2 точками черного цвета отмечены области, для которых стратификация плотности может быть аппроксимирована двухслойной моделью по данным за январь (слева) и июль (справа) из атласов GDEM и RCO. Как видно из карт, в основном двухслойная стратификация встречается в Финском заливе в районе Выборга, на севере Ботнического залива, южнее острова Готланд (в июле), в Рижском заливе (в июле), в некоторых областях западной части Балтийского моря, а также вблизи Куршской косы (в июле). Таким образом, наибольшее количество соответствий стратификации плотности нашей параметрической модели с двумя слоями выявлено для летнего периода.

На рис. 3 черными точками показаны области, для которых стратификация плотности может быть аппроксимирована трехслойной моделью по данным за январь (слева) и июль (справа). Как видно из рис. 3, трехслойная модель характерна для многих районов Балтийского моря в летний период (Финский залив, Ботнический залив (небольшие области), Рижский залив, центральный район Балтийского моря, Борнхольмский бассейн, некоторые области юго-восточной части), зимой же большая часть точек сосредоточена в Финском заливе.

Рассмотрим распределение числовых значений параметров трёхслойной модели в Балтийском море. На рис. 4 и 5 (см. вклейку) представлены карты глубины (в метрах) залегания верхнего и нижнего скачков плотности по данным за январь и июль. Можно видеть из рис. 4, что в январе глубина залегания верхнего скачка плотности в центральной части Балтийского моря составляет 20—30 м. Значение этой величины порядка 10—15 м наблюдается лишь в восточном районе (Финский залив). Эти результаты согласуются с известными климатологическими закономерностями для Балтийского моря: зимой с увеличением скорости ветра над морем перемешивание проникает до горизонтов 20—30 м в центральных и южных районах, а на востоке — до 10—15 м, так как ветры здесь сравнительно слабые. Это способствует формированию верхнего однородного слоя [24]. В летний период толщина верхнего слоя

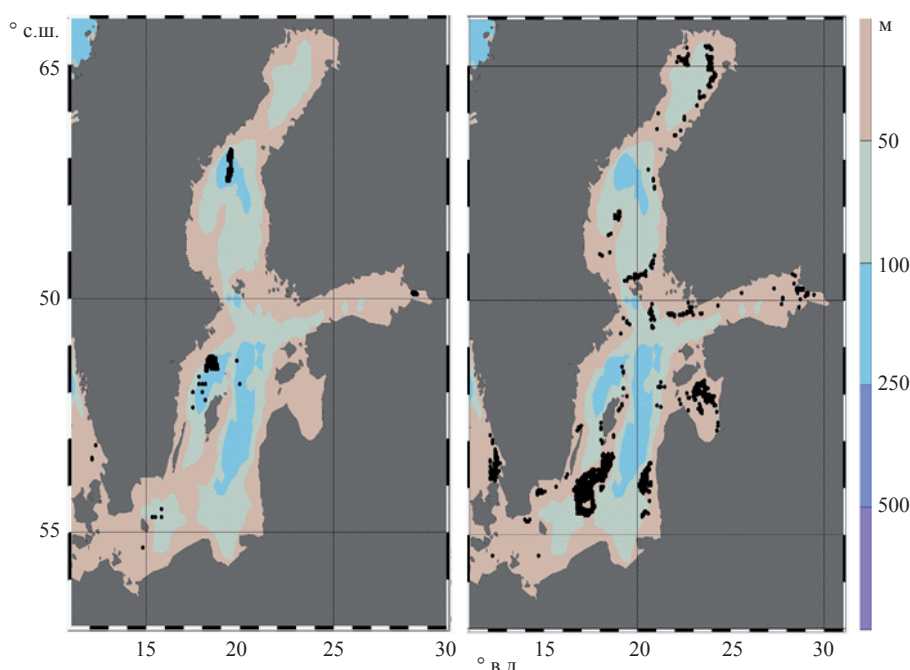


Рис. 2. Области (показанные черным цветом), для которых стратификация плотности может быть аппроксимирована двухслойной моделью по данным за январь (слева) и июль (справа).

Fig. 2. Areas (marked in black) for which the density stratification can be approximated by a two layer model according to hydrological data obtained in January (left) and July (right).

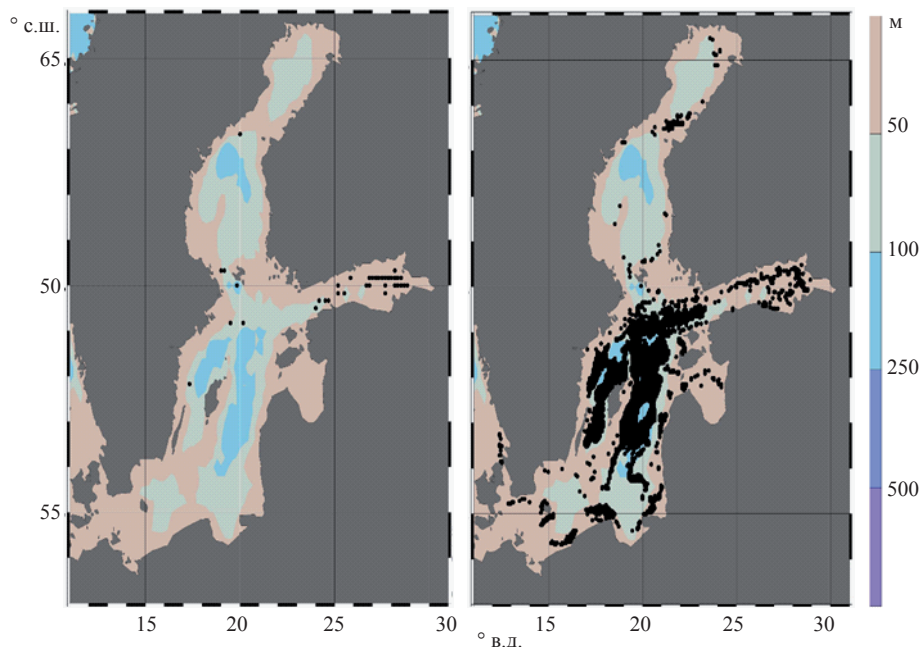


Рис. 3. Области (показанные черным цветом), для которых стратификация плотности может быть аппроксимирована трехслойной моделью по данным за январь (слева) и июль (справа).

Fig. 3. Areas (marked in black) for which the density stratification can be approximated by a three-layer model according to hydrological data obtained in January (left) and July (right).

составляет порядка 5—10 м в северной и восточной части Балтийского моря и колеблется в диапазоне 12—18 м в центральном и южном районе. Глубина залегания придонного слоя в январе в Финском заливе колеблется от 20—30 м в самой мелководной части до 70 м в глубоководной. Летом в центральной части Балтийского моря второй пикноклин, расположенный на глубине порядка 70 м, отделяет нижний придонный слой морской воды, что также хорошо согласуется с общеизвестными океанологическими представлениями о гидрологических особенностях Балтийского моря [24].

На рис. 6 и 7 (см. вклейку) показаны отношения Δ_1 к $(\Delta_1 + \Delta_2)$ и Δ_2 к $(\Delta_1 + \Delta_2)$, соответственно, т. е. вклады верхнего Δ_1 и нижнего Δ_2 скачка плотности в общий скачок плотности. При этом следует пояснить, что параметрическая модель вертикального распределения плотности морской воды (1) такова, что на каждый скачок плотности (Δ_1 и Δ_2) приходится удвоенное по величине изменение плотности между скачками. В зимний период для большинства точек величина верхнего и нижнего скачка плотности примерно одинакова. Летом верхний пикноклин наиболее выражен на севере (Ботнический залив) и на востоке (в частности, в Финском заливе), а также вдоль всего восточного побережья (здесь верхний пикноклин также формируется за счет распреснения, поскольку в этой части в Балтийское море впадает большое количество пресноводных рек, таких как Нева, Нарва, Западная Двина (Даугава), Неман, Преголя, Висла), в Гданьском заливе и Борнхольмском бассейне. В центральной части Балтийского моря либо преобладает нижний скачок плотности, либо нижний и верхний пикноклины дают примерно одинаковый вклад в общее изменение плотности (вода имеет более выраженную соленостную стратификацию).

Проведено зонирование Балтийского моря по типу плотностной стратификации на основе данных GDEM, а также данных, полученных из модели RCO. Результаты параметризации плотности вод Балтийского моря с помощью двух- и трехслойных моделей показали хорошую согласованность для данных GDEM и RCO при условии высоких требований, предъявленных к качеству аппроксимации профилей плотности. Выявлены географические и климатические особенности зонирования. Продемонстрировано отличие распределений двух- и трехслойных областей в январе и июле. Показано, что в рамках выбранной параметрической модели в летний период Балтийское море в большей степени является трехслойным. В зимний период структура профиля плотности имеет более сложный характер,

и, в рамках предложенных модельных профилей и требований точности аппроксимации, большая часть площади Балтийского моря зимой остается вне классификации. Полученные результаты соответствуют существующим представлениям о физико-географических и климатических закономерностях, формирующих вертикальные профили вод Балтийского моря.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 5.4568.2017/6.7 и задание № 5.1246.2017/4.6) и при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5 и гранта РФФИ №. 16-35-00413.

Литература

1. Alenius P., Myrberg K., Nekrasov A. The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review // *Boreal Env. Res.* 1998. V. 3. P. 97—125.
2. Серебряный А. Н., Иванов В. А. Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2013. № 3. С. 34—45.
3. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // *Исследование земли из космоса.* 2009. № 5. С. 72—79.
4. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2010. Т. 7, № 1. С. 260—272.
5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // *Исследование Земли из космоса.* 2009. № 6. С. 49—55.
6. Лаврова О. Ю., Каримова С. С., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю. Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009—2010 годах // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2010. Т. 7, № 3. С. 168—185.
7. Meier H.E.M., Döscher R., Coward A.C., Nycander J., Döös K. RCO-Rosby Centre regional Ocean climate model: Model description (version 1.0) and first results from the hindcast period 1992/93, Rep. Oceanogr. 26, Swed. Meteorol. Hydrol. Inst., Norrköping, Sweden, 1999. 102 p.
8. Kurkina O., Kurkin A., Soomere T., Rybin A., Tyugin D. Pycnocline variations in the Baltic Sea affect background conditions for internal waves // *Proceedings of Baltic International Symposium (BALTIC), 2014 IEEE/OES, "Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment"* May 26—29, 2014, Tallinn, Estonia, 2014. P. 1—8.
9. Leppäranta M., Myrberg K. *Physical Oceanography of the Baltic Sea.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2009. 378 p.
10. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27, N 6. P. 871—896.
11. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. A generalized Korteweg-de Vries model of internal tide transformation in the coastal zone // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104/C8. P. 18333—18350.
12. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T. Internal tide transformation and oceanic internal solitary waves // *Environmental Stratified Flows*, ed. by: Grimshaw R. Boston: Kluwer, 2001. P. 29—60.
13. Ostrovsky L. A., Grue J. Evolution equations for strongly nonlinear internal waves // *Phys. Fluids.* 2003. V. 15. P. 2934—2948.
14. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T. Modeling internal solitary waves in the coastal ocean // *Survey in Geophysics.* 2007. V. 28, N 2. P. 273—298.
15. Helfrich K. R., Melville W. K. Long nonlinear internal waves // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2006. V. 38. P. 395—425.
16. Талипова Т. Г., Пелиновский Е. Н., Куркина О. Е., Диденкулова И. И., Родин А. А., Панкратов А. С., Наумов А. А., Гиниятуллин А. Р., Николкина И. Ф. Распространение волны конечной амплитуды в стратифицированной жидкости переменной глубины // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии.* 2012. Выпуск 2 (10). С. 144—150.
17. Талипова Т. Г., Куркина О. Е., Рувинская Е. А., Пелиновский Е. Н. Распространение уединенных внутренних волн в двухслойном океане переменной глубины // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51, № 1. С. 1—10.
18. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T. The modified Korteweg-de Vries equation in the theory of large-amplitude internal waves // *Nonlinear Processes in Geophysics.* 1997. V. 4, N 4. P. 237—350.
19. Рувинская Е. А., Куркина О. Е., Куркин А. А. Уточненное нелинейное эволюционное уравнение для внутренних гравитационных волн в трехслойной симметричной жидкости // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева.* 2010. V. 4 (83). С. 30—39.
20. Kurkina O. E., Kurkin A. A., Soomere T., Pelinovsky E. N., Rouvinskaya E. A. Higher-order (2+4) Korteweg-de Vries - like equation for interfacial waves in a symmetric three-layer fluid // *Physics of Fluids.* 2011. V. 23, N 11. P. 116602—1—13.
21. Куркина О. Е., Куркин А. А., Рувинская Е. А., Пелиновский Е. Н., Соомере Т. Динамика солитонов неинтегрируемой версии модифицированного уравнения Кортвега-де Вриза // *Письма в ЖЭТФ.* 2012. Т. 95, № 2. С. 98—103.
22. Kurkina O. E., Kurkin A. A., Rouvinskaya E. A., Soomere T. Propagation regimes of interfacial solitary waves in a three-layer fluid // *Nonlinear Processes in Geophysics.* 2015. V. 22. P. 117—132.
23. Макаров В. Г., Будаева В. Д. Реконструкция фонового распределения плотности в районе северо-восточного побережья о. Сахалин для летнего периода на основе параметризации вертикальной структуры вод // *Сборник статей РЭА № 1. Владивосток: Дальнаука,* 2009. С. 146—161.
24. Зонн И. С. и др. Балтийское море: энциклопедия. М: Международные отношения, 2015. 572 с.

К статье Рувинская Е. А. и др. Зонирование по типам...

Rouvinskaya E. A. et al. Mapping of the Baltic Sea by the types...

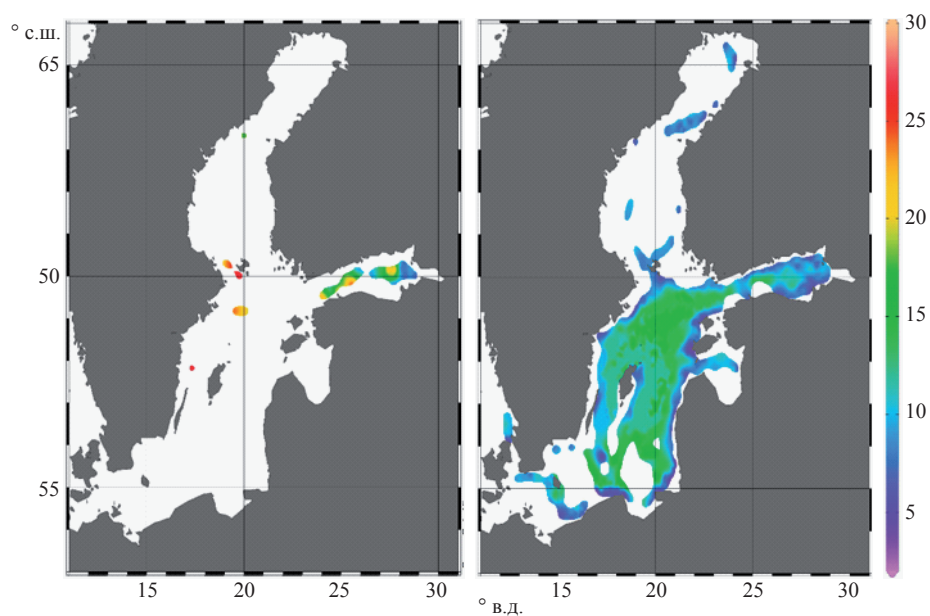


Рис. 4. Глубина первого скачка плотности (в метрах) по данным, полученным в январе (слева) и в июле (справа).

Fig. 4. The depth of the first density jump (in meters), according to data obtained in January (left) and in July (right).

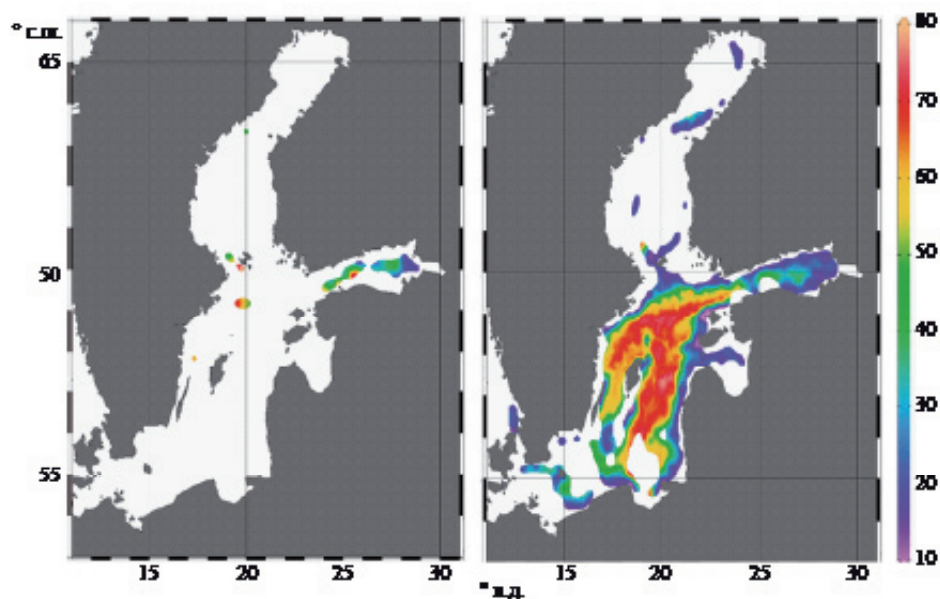


Рис. 5. Глубина второго скачка (в метрах), по данным, полученным в январе (слева) и в июле (справа).

Fig. 5. The depth of the second density jump (in meters), according to data obtained in January (left) and in July (right).

К статье Рувинская Е. А. и др. Зонирование по типам...

Rouvinskaya E. A. et al. Mapping of the Baltic Sea by the types...

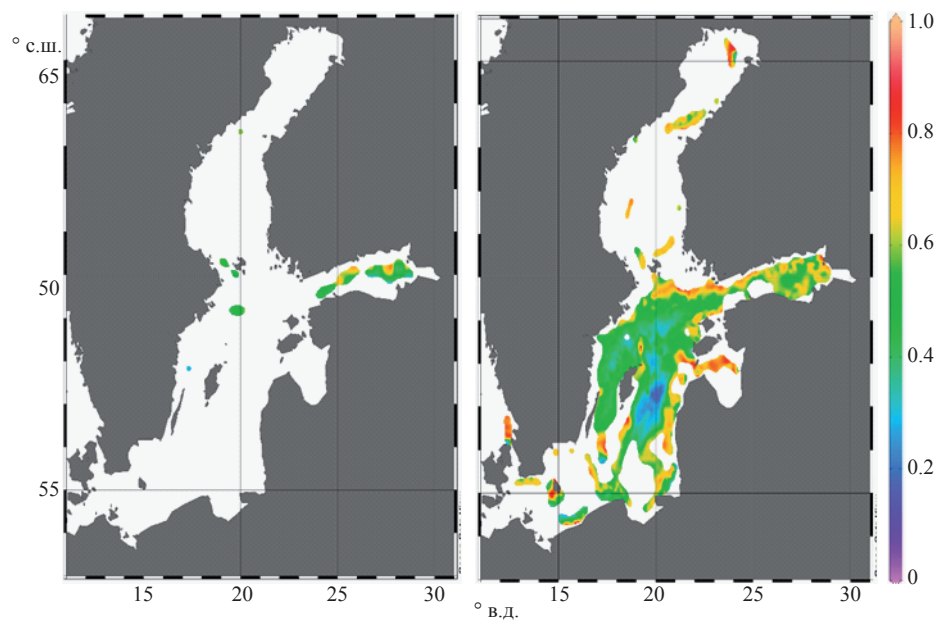


Рис. 6. Величина верхнего скачка плотности в долях единицы от общего изменения плотности по данным за январь (слева) и июль (справа).

Fig. 6. The value of the upper density jump in fractions of unity of the total density change, according to data obtained in January (left) and in July (right).

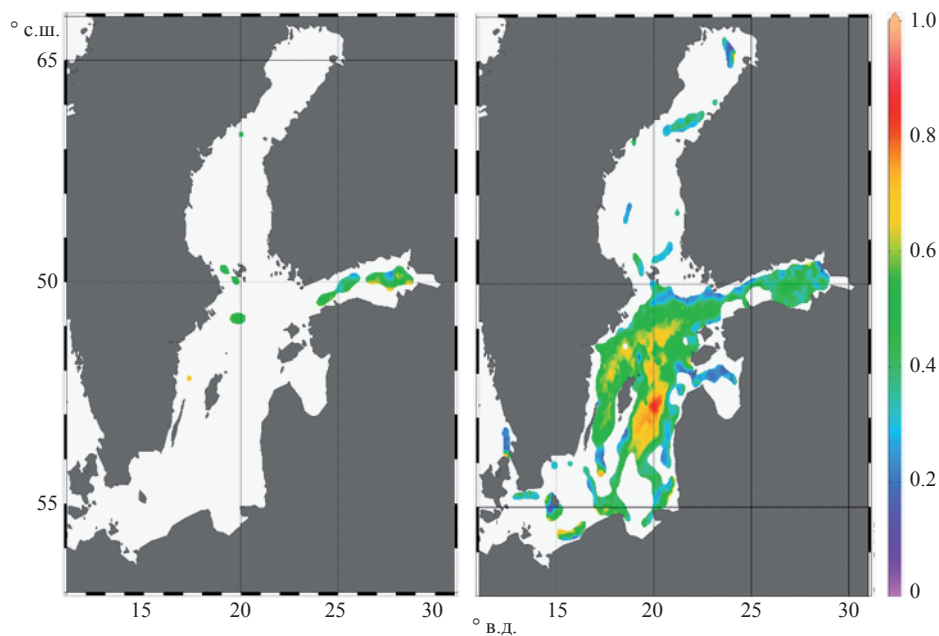


Рис. 7. Величина нижнего скачка плотности в долях единицы от общего изменения плотности по данным за январь (слева) и июль (справа).

Fig. 7. The value of the lower density jump in fractions of unity of the total density change, according to data obtained in January (left) and in July (right).