

УДК 004.415

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_18

## ОКЕАНОГРАФИЧЕСКАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ОНЛАЙН-СИСТЕМА ДЛЯ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ БАССЕЙНАХ

**М.В. Кокоулина**

ORCID: 0000-0001-5890-3649 e-mail: kokoulinamaria97@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.С. Епифанова**

ORCID: 0000-0003-1061-0964 e-mail: epifanova.anastasia.s@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***О.Е. Куркина**

ORCID: 0000-0002-4030-2906 e-mail: oksana.kurkina@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.А. Куркин**

ORCID: 0000-0003-3828-6406 e-mail: aakurkin@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***М.С. Винокуров**

ORCID: 0000-0001-7003-9726 e-mail: crz@mvinokurov.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***С.А. Епифанов**

ORCID: 0009-0000-5585-6082 e-mail: epifanov.s.a@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлена океанографическая геоинформационная онлайн-система для расчета и анализа дисперсионных, кинематических, нелинейных, силовых и транспортных характеристик внутренних волн, предназначенная для хранения и быстрого доступа к ним. В работе используются данные температуры и солёности из международного гидрологического атласа WOA18, сведения о батиметрии – из атласа GEBCO-2022, данные горизонтального потока воды для компонент прилива – из модели TPX08. Представлена схема онлайн-системы, рассмотрены основные режимы её работы. Приведено описание расчетных блоков, входящих в систему, а также пользовательского интерфейса и функциональных возможностей. Описана схема базы данных, обеспечивающей хранение результатов обработки и анализа исходных данных. Рассмотрены основные инструменты, используемые при разработке онлайн-системы. Разработанная система уникальна и актуальна для данного класса геофизических приложений, может использоваться при планировании как численных, так и натуральных экспериментов.

**Ключевые слова:** геоинформационная онлайн-система, обработка данных, база данных, Python, гидрологические данные, WOA18, GEBCO-2022, TPX08, внутренние волны, Мировой океан.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кокоулина, М.В. Океанографическая геоинформационная онлайн-система для расчета и анализа характеристик внутренних волн в стратифицированных бассейнах / М.В. Кокоулина, А.С. Епифанова, О.Е. Куркина, А.А. Куркин, М.С. Винокуров, С.А. Епифанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 18-29. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_18

## OCEANOGRAPHIC ONLINE GEOINFORMATION SYSTEM FOR CALCULATION AND ANALYSIS OF THE INTERNAL WAVE CHARACTERISTICS IN STRATIFIED BASINS

**M.V. Kokoulina**

ORCID: **0000-0001-5890-3649** e-mail: **kokoulinamaria97@gmail.com**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.S. Epifanova**

ORCID: **0000-0003-1061-0964** e-mail: **epifanova.anastasia.s@gmail.com**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**O.E. Kurkina**

ORCID: **0000-0002-4030-2906** e-mail: **oksana.kurkina@mail.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Kurkin**

ORCID: **0000-0003-3828-6406** e-mail: **aakurkin@nntu.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.S. Vinokurov**

ORCID: **0000-0001-7003-9726** e-mail: **crz@mvinokurov.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.A. Epifanov**

ORCID: **0009-0000-5585-6082** e-mail: **epifanov.s.a@yandex.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** An online oceanographic information system for the calculation and analysis of dispersion, kinematic, nonlinear, force and transport characteristics of internal waves is presented. It is designed to store and quickly access these characteristics. We use temperature and salinity data from the international hydrological atlas WOA18, bathymetry data from the atlas GEBCO-2022, and horizontal water flow data for tidal components from the TPX08 model. A scheme of the online system is given. It describes calculation blocks, user interface, functionality and main modes of the system. The scheme of the database, which provides storage of the results of processing and analysis, is presented. The main tools used in the development of the online system are described. The developed system is unique and relevant for this class of geophysical applications. It may be used for planning both numerical and in-situ experiments.

**Key words:** online geoinformation system, data processing, database, Python, hydrological data, WOA18, GEBCO-2022, TPX08, internal waves, World Ocean.

**FOR CITATION:** M.V. Kokoulina, A.S. Epifanova, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin, M.S. Vinokurov, S.A. Epifanov. Oceanographic online geo-information system for calculation and analysis of the internal wave characteristics in stratified basins. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № . Pp. 18-29. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_18

## Введение

Внутренние волны, наблюдаемые во всех акваториях Мирового океана, являются важным элементом его динамической структуры. Известно большое количество работ, посвященных исследованию воздействия интенсивных внутренних волн на процессы, протекающие в стратифицированных акваториях: перераспределение потоков тепла, импульса, перемешивание вод, горизонтальный и вертикальный обмен, формирование рельефа дна и др. [1-9]. Также установлено, что они оказывают влияние на прибрежные и морские гидротехнические сооружения [10, 11]. Из-за недостаточного объема натурных данных для изучения внутренних волн часто используются массивы усредненных и сглаженных измерений из международных (*World Ocean Atlas* [12] и *Generalized Digital Environmental Model* [13]) и российских (ЕСИМО – единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане, <http://esimo.ru/portal/>) гидрологических атласов. Сведения о вертикальном распределении плотности (температуры и солёности) позволяют проводить предварительный анализ, дающий общее представление о ряде характеристик внутренних волн и свойствах нелинейных динамических процессов, зависящих от внешних условий среды. По гидрологическим профилям можно определить различные экзогенные (т.е. диктуемые средой) параметры: вертикальную структуру, дисперсионные кривые для бароклинных мод, различные характеристики длинных волн и прочие. Кроме того, связанные с волновой динамикой стратифицированных вод океанографические физические задачи, как правило, предполагают проведение значительной предобработки данных [14]. Соответственно, создание онлайн-системы, содержащей характеристики внутренних волн, рассчитанные по данным из различных гидрологических атласов, а также позволяющей строить карты этих параметров для различных акваторий Мирового океана, является актуальной задачей.

## Описание исходных гидрологических данных

Данные гидрологических атласов неоднократно использовались для проведения различных исследований в акваториях Мирового океана [15-17], например, для решения практических задач: нахождения модового состава, построения дисперсионных кривых [18-20], оценки действия модуляционной неустойчивости в рамках уравнений Гарднера и нелинейного уравнения Шрёдингера, нахождения критической (минимальной) частоты внутренних волн, а также расстояния, на котором развивается неустойчивость [21], исследования потенциала внутренних волн в переносе наносов и связи с развитием эрозионных зон [22, 23], оценки скоростей волн и других параметров [24-30].

В работе используются данные температуры и солёности из международного гидрологического атласа *World Ocean Atlas 2018* (WOA18). В этом климатологическом атласе с открытым исходным кодом представлена сводная информация о гидрофизических параметрах морской воды и их сезонных изменениях. Он содержит массивы усредненных и сглаженных данных об измерениях температуры, солёности и других гидрологических параметров [12]. Данные WOA18 представлены на регулярной сетке с разрешением 5, 1 или 1/4°; они представляют собой вертикальные профили температуры и солёности, усредненные за год, сезон и месяц на стандартных уровнях от 0 до 5500 м. Главным преимуществом этого атласа по сравнению с *GDEM* или российским ЕСИМО является интуитивно понятный интерфейс сайта и простота доступа к данным в любом удобном формате (netCDF, csv, ASCII, ArcGIS). Также в работе использовались данные Общей батиметрической карты Мирового океана *GEBCO* (*General Bathymetric Chart of the Oceans*, <https://www.gebco.net> – общедоступный цифровой атлас батиметрии Мирового океана). Последняя версия *GEBCO-2022* содержит набор данных батиметрии с разрешением 15 угловых секунд. Значения данных регистрируются по центру пикселя, т.е. они относятся к высотам (м) в центре ячеек сетки. Данные горизонтального потока воды для компонент прилива обычно берутся из

расчетов по приливной модели *TPXO 8* (*A TOPEX/Poseidon Global Tidal Model*), основанной на данных спутниковой альтиметрии [31, 32]. Исходя из этой модели, прилив можно рассчитать в любой точке Мирового океана и для любого периода времени. Информация об исходных данных для расчетов характеристик внутренних волн, а также их источниках, представлена в табл. 1.

**Таблица 1.**  
**Исходные гидрологические данные из WOA18, GEBCO-2022, TPXO 8**

**Table 1.**  
**Input hydrological data from WOA18, GEBCO-2022, TPXO 8**

Исходные данные (единицы измерения)	Пространственное разрешение	Источник
Температура, $T$ (°C)	1/4 градуса	WOA18
Соленость, $S$ (PSU)		
Глубина, $H$ (м)	15 угловых секунд	GEBCO-2022
Интегрированный по глубине зональный перенос Компонента (E/W), $U$ (м/с)	1/6 градуса	TPXO 8
Интегрированный по глубине меридиональный перенос Компонента (N/S), $V$ (м/с)		

Исходные данные хранятся в формате *NetCDF*, который часто используется для работы с научными данными, преимущественно в области океанологии, климатологии, метеорологии, и в различных геоинформационных системах. Он является самодокументируемым и позволяет хранить многомерные массивы (временные ряды, географические карты и т.д.), а также их метаданные (например, единицы измерения, координаты, описание переменных). Каждый файл содержит универсальный описывающий его структуру заголовков, массивы, сохраненные в нем, и набор пар ключ-значение для хранения произвольных атрибутов. На рис. 1 приведен пример файла *NetCDF* из атласа *WOA18* (красной рамкой выделены атрибуты переменной «lat»).

```
netcdf woa18_5564_t00_01 {
dimensions:
  nbounds = 2 ;
  lat = 180 ;
  lon = 360 ;
  depth = 102 ;
  time = 1 ;
variables:
  int crs ;
  crs:grid_mapping_name = "latitude_longitude" ;
  crs:epsg_code = "EPSG:4326" ;
  crs:longitude_of_prime_meridian = 0.f ;
  crs:semi_major_axis = 6378137.f ;
  crs:inverse_flattening = 298.2572f ;
float lat(lat) ;
  lat:standard_name = "latitude" ;
  lat:long_name = "latitude" ;
  lat:units = "degrees_north" ;
  lat:axis = "Y" ;
  lat:bounds = "lat_bnds" ;
float lat_bnds(lat, nbounds) ;
  lat_bnds:comment = "latitude bounds" ;
```

**Рис. 1.** Пример файла NetCDF [12]

**Fig. 1.** Example of a NetCDF file [12]

## Архитектура геоинформационной системы

Проект реализован на языке *Python* (в кроссплатформенной среде разработки *PyCharm*), поскольку геоинформационная система расположена в открытом доступе на сайте Научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева в разделе «Проекты» ([https://lmmnad.nttu.ru/ru/projects/property\\_IW/](https://lmmnad.nttu.ru/ru/projects/property_IW/)), серверная часть которого написана на этом языке программирования. Для чтения данных в формате *NetCDF* используется библиотека *NetCDF4*. Схема разработанной системы представлена на рис. 2.

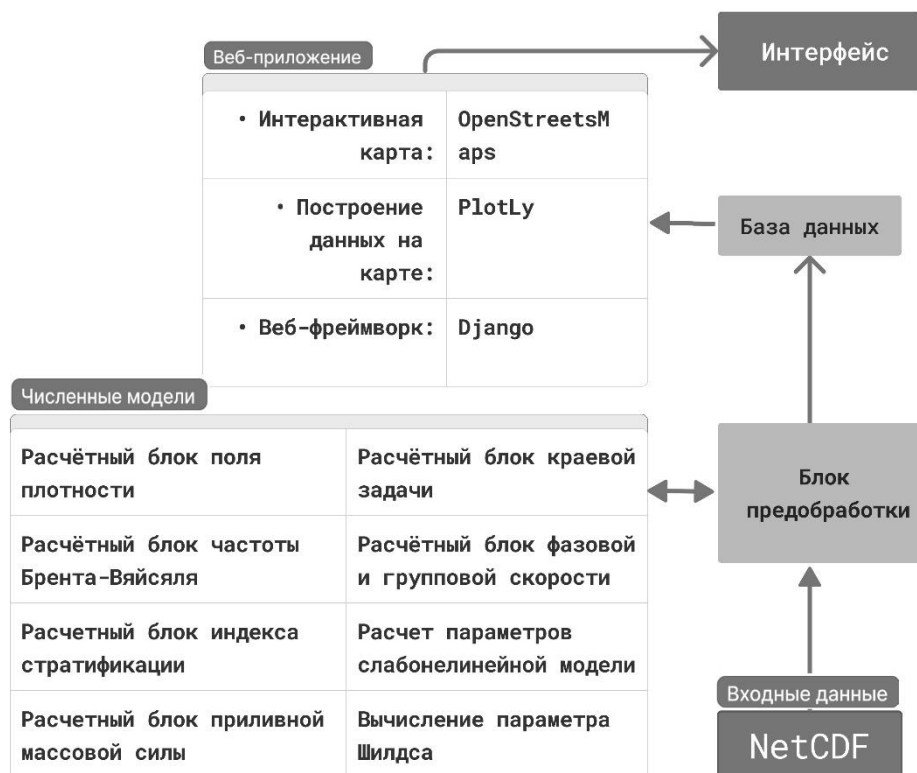


Рис. 2. Схема разработанной геоинформационной системы

Fig. 2. The scheme of the developed geoinformation system

После чтения входные данные проходят предобработку и подготовку к дальнейшим расчетам в соответствии с требованиями конкретной модели. Это связано с тем, что при вычислениях, например, приливной объемной силы плавучести, используется несколько атласов, имеющих разный формат и разрешение сетки: вектор градиента батиметрии был рассчитан на исходной сетке *GEBCO 2022* (15 угловых секунд), затем данные были интерполированы на самую грубую сетку. Результирующий массив значений этой силы представлен на сетке, горизонтальное разрешение которой определяется пространственным разрешением входных данных атласа *WOA18* (1/4 °). Данные из модели *TPXO 8* выгружены на заданную пользовательскую сетку (1/4 °) в массивы библиотеки NumPy.

Все расчетные блоки, представленные на рис. 2, базируются на вычислении профиля плотности. На основе исходных данных с помощью уравнения состояния морской воды *TEOS10* (реализация термодинамического уравнения морской воды на языке *Python* доступна по ссылке [github.com/TEOS-10/GSW-Python](https://github.com/TEOS-10/GSW-Python)) для каждой точки расчетной области проведено вычисление профиля плотности, на основе которого рассчитан профиль частоты Вяйсяля-Брента. Во всех расчетах были исключены точки, в которых профиль плотности содержал большой процент инверсий (>20 %), и точки с глубиной меньше 10 м.

Расчетный блок индекса стратификации в качестве входных данных принимает распределение плотности и вычисляет [33-35] значение индекса стратификации  $I$  (здесь и далее обозначения в скобках соответствуют названию полей в схеме базы данных (рис. 3)) в конкретной точке. Эта величина показывает, сколько энергии необходимо для полного перемешивания водяного столба единичного объема. Зоны с более ярко выраженными вертикальными перепадами плотности морской воды характеризуются большими значениями индекса стратификации и представляют собой благоприятную среду для более интенсивных бароклинных процессов с высокой плотностью потоков бароклинной энергии, что может быть использовано при планировании гидротехнических работ и хозяйственной деятельности. Также наряду с картами индекса стратификации могут использоваться карты приливной массовой силы [36-38], которые также представлены в системе. Для вычисления этой величины необходимы данные об изменении частоты Вьясяля-Брента, батиметрии  $H$  (табл. 1) и приливах  $U, V$  (табл. 1). Пространственное изменение приливной массовой силы  $F$  позволяет выявить наиболее вероятные зоны генерации внутренних волн. Также одной из основных задач при исследовании внутренних волн является вычисление бароклинных мод и дисперсионных кривых (*mode* и *omega* соответственно). Данные характеристики находятся из решения задачи Штурма-Лиувилля и позволяют лучше понять структуру волнового поля [39, 40]. В данном комплексе проводится расчет трех низших бароклинных мод для диапазона волновых чисел и соответствующих им дисперсионных кривых. На основе зависимости частоты внутренних волн от волнового числа вычислены значения фазовой скорости и групповой. Данный функционал представлен в отдельном расчетном блоке. В блоке, отвечающем за расчет коэффициентов слабонелинейной модели, реализовано решение краевой задачи в длинноволновом приближении, на основе которого выполняется расчет дисперсии ( $\beta$ ), квадратичной ( $\alpha$ ) и кубической нелинейности ( $\alpha_1$ ) [41-43].

Перед запуском расчетов по всему Мировому океану численные алгоритмы были отлажены на модельных данных, и проведено сравнение полученных результатов с результатами других авторов [18, 19, 35, 44]. После этого проведен расчет перечисленных характеристик для каждого узла сетки. Результаты обработки и анализа исходных данных хранятся в базе данных, ее схема приведена на рис. 3. База данных состоит из трех таблиц: «Географические координаты», «Изображения» и «Массив». Каждая из них содержит первичный ключ (*id*) – значение, которое уникально для каждой записи. В таблице «Географические координаты» для каждого узла расчетной сетки хранятся следующие данные: широта (*LAT*), долгота (*LON*), максимальное ( $T_{max}$ ) и минимальное ( $T_{min}$ ) значения температуры, максимальное ( $S_{max}$ ) и минимальное ( $S_{min}$ ) значения солёности, максимальное ( $N_{max}$ ) и минимальное ( $N_{min}$ ) значения частоты Вьясяля-Брента и глубина залегания максимального значения ( $P_{dep}$ ), индекс стратификации ( $I$ ), массовая сила плавучести ( $F$ ), фазовая скорость длинных внутренних волн ( $c$ ), коэффициент дисперсии ( $\beta$ ), коэффициент квадратичной нелинейности ( $\alpha$ ), коэффициент кубической нелинейности ( $\alpha_1$ ) и в виде ссылок на графические объекты – результаты вычисления фазовой и групповой скорости (*sp\_cg*), дисперсионные кривые (*omega*).

В таблице «Изображения» для каждой географической точки (узла) хранятся номера мод (*mode*) и ссылки на соответствующие изображения (*path*).

В таблице «Массив» для каждого узла содержатся массивы величин (исходные значения температуры и солёности, а также плотность и частота Вьясяля-Брента) (*data\_array*), выгруженные на стандартных глубинах (*height*) от 0 до 5500 м.

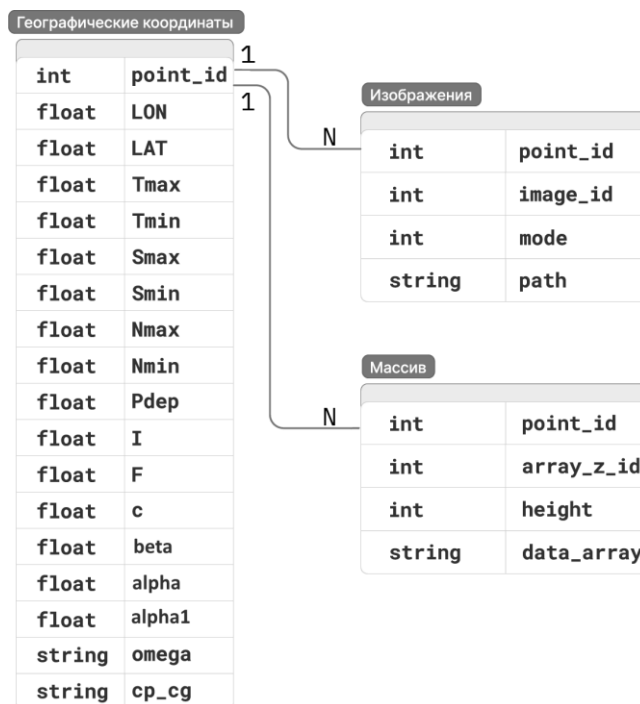


Рис. 3. Схема базы данных, содержащей результаты обработки и анализа исходных данных

Fig. 3. The scheme of the database containing the results of processing and analysis of initial data

### Веб-интерфейс

Для быстрого и удобного доступа к рассчитанным характеристикам внутренних волн был реализован веб-интерфейс с использованием *Django* – высокоуровневого веб-фреймворка, который предназначен для быстрого и удобного создания веб-приложений. Он предоставляет готовые решения для таких задач, как работа с базами данных, аутентификация, обработка форм, кеширование и др. Результаты расчетов отображаются на интерактивной карте мира. В рамках нашего веб-приложения используется открытая карта мира *OpenStreetMap* (<https://www.openstreetmap.org>). Она позволяет пользователям взаимодействовать с данными, нажимая на точки на карте и выводя информацию о конкретных географических локациях. Для доступа к проекту необходима авторизация на сайте <https://lfnad.nntu.ru/>. На главной странице (рис. 4) представлена интерактивная карта Мирового океана, на которой точками оранжевого цвета отмечены исходные данные, полученные из атласа *WOA18*. В этом разделе пользователю доступен просмотр данных температуры, солености, профиля плотности, рассчитанного на основе исходных данных с помощью уравнения состояния морской воды *TEOS10*, а также профиль частоты Вьясяля-Брента. При нажатии на выбранный узел расчетной сетки сведения отображаются в виде графических объектов, которые могут быть сохранены в формате *jpg*. Также в таблицу выводятся максимальные и минимальные значения температуры, солености, плотности, частоты плавучести для выбранной точки. Все результаты доступны как для лета, так и для зимы. Для выбора сезона встроен переключатель *RadioButton*. Справа от карты расположены кнопки для перехода к результатам расчетов. Разделы «Индекс стратификации», «Приливная массовая сила» и «Коэффициенты слабонелинейной модели» имеют схожий интерфейс (с возможностью выбора сезона зима/лето). Доступно два режима просмотра информации: в виде исходных данных (по точкам из атласа *WOA18*, как на главном окне (рис. 4)) и в виде цветовой карты (рис. 5). В первом режиме пользователь может посмотреть значения в конкретной точке Мирового океана, второй режим удобен для отображения пространственного изменения характеристики. Функционал реализован с применением библиотеки *Plotly*.



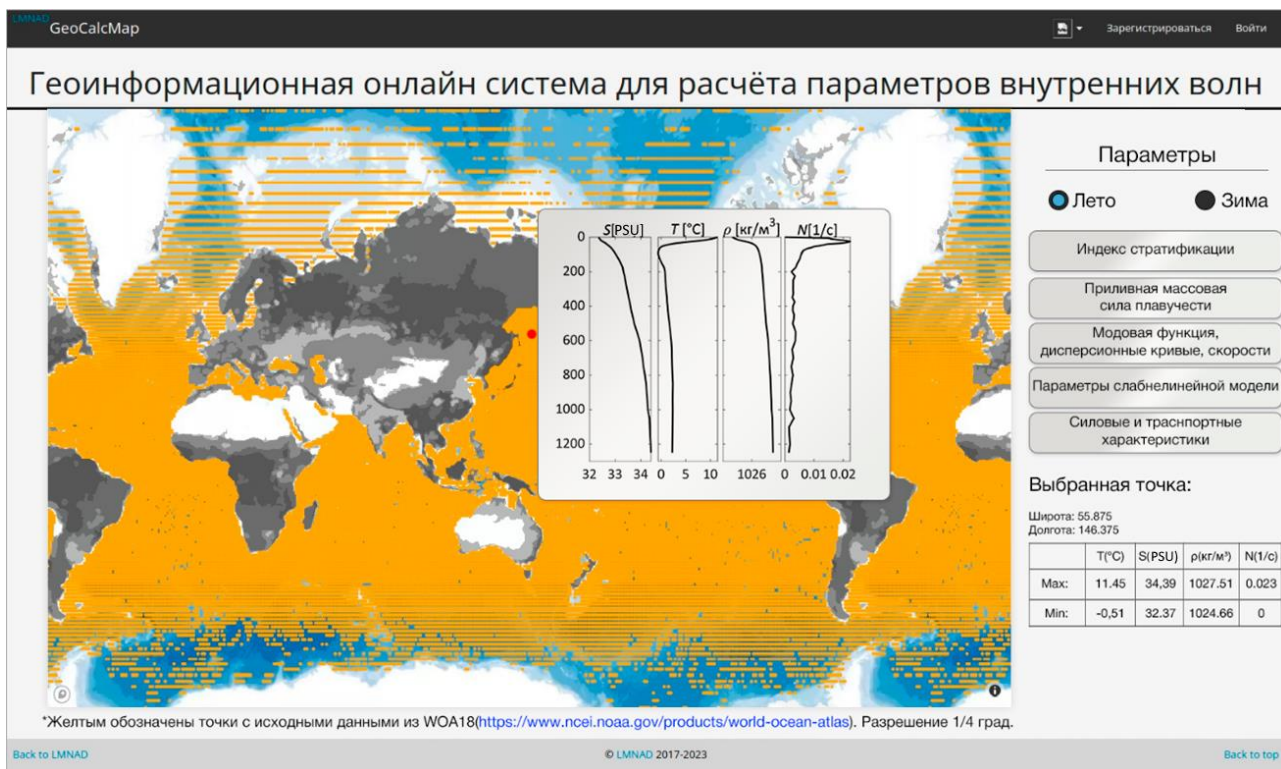


Рис. 4. Главная страница океанографической геоинформационной онлайн-системы

Fig. 4. The main page of the online geo-information system

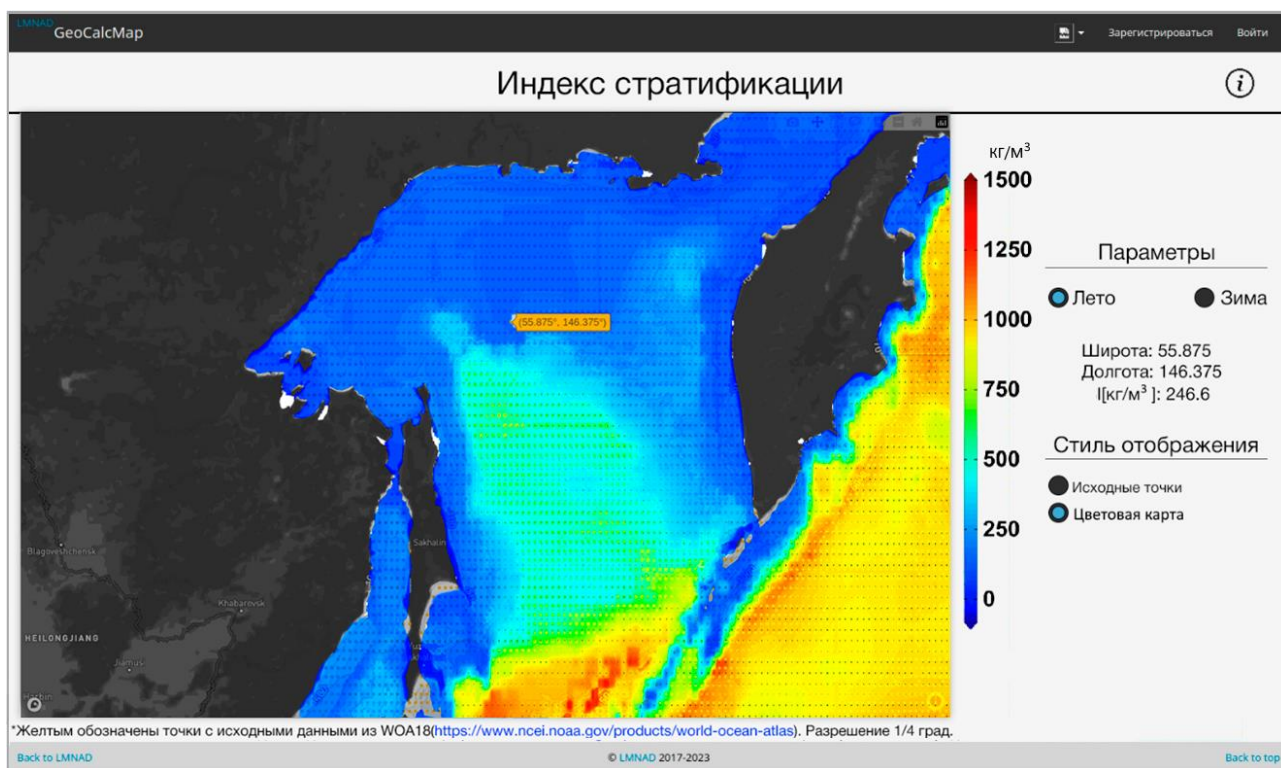


Рис. 5. Интерфейс страницы «Индекс стратификации» (режим цветовой карты)

Fig. 5. Interface of the «Stratification Index» page (color map mode)



Также в правом верхнем углу расположена кнопка («i») для вызова раздела «Справка», который содержит сведения об интерфейсе и теоретический материал. Эта функция доступна из любого раздела системы. Раздел «Модовая функция, дисперсионные кривые, скорости» предоставляет доступ к информации о вертикальной структуре бароклинных волн и их дисперсионных характеристиках. Вывод данных осуществляется в виде графических объектов при нажатии на точку сетки во всплывающем окне (рис. 6).

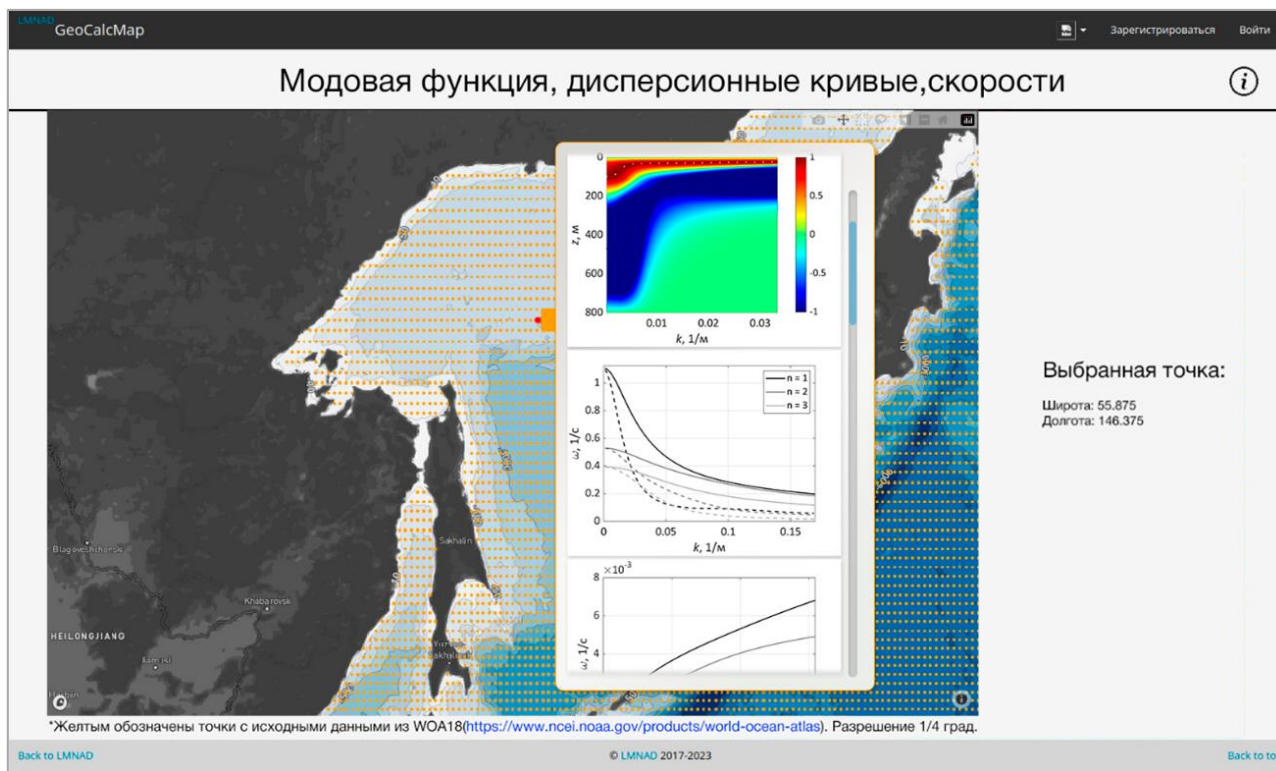


Рис. 6. Интерфейс страницы «Модовая функция, дисперсионные кривые, скорости»

Fig. 6. Interface of the «Mode function, dispersion curves, velocities» page

Раздел «Силовые и транспортные характеристики» находится в разработке. В нем планируется реализовать вычисление параметра Шилдса по заданной амплитуде придонной скорости с учетом значения волнового числа/частоты и вертикальной структуры для волн соответствующей моды и определение вероятностных уровней смещения для несвязного грунта известной фракции.

### Выводы

Проведены расчеты дисперсионных, кинематических, нелинейных характеристик внутренних волн на основе данных открытого гидрологического атласа *WOA18*, а также с использованием данных батиметрии из атласа *GEBCO-2022* и данных прилива из модели *TPXO8*. Реализованы математические модели для расчета всех перечисленных параметров внутренних гравитационных волн. Создана база данных для хранения рассчитанных характеристик. Для удобного и быстрого доступа к данным разработана океанографическая геоинформационная онлайн-система, которая позволяет производить расчет и анализ кинематических, нелинейных, дисперсионных, силовых и транспортных характеристик внутренних волн в Мировом океане. Приведено описание структуры, интерфейса и функциональности системы. Проект имеет большой потенциал дальнейшего развития и совершенствования как в плане математических моделей, так и в аспекте практического применения.

*Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0004 «Нелинейная волновая динамика прибрежной зоны в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия») и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-70.2022.1.5, а также стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-692.2021.5).*

### Библиографический список

1. **Краусс, В.** Внутренние волны / В. Краусс. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 272 с.
2. **Морозов, Е.Г.** Океанские внутренние волны / Е.Г. Морозов. – М.: Наука, 1985. – 151 с.
3. **Сабинин К.Д.** Волны внутри океана / К.Д. Сабинин, К.В. Коняев. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 272 с.
4. **Bogucki, D.** Sediment resuspension and mixing by resonantly generated solitary waves / D. Bogucki, T. Dikky, L.G. Redekopp // *Journal of Physical Oceanography*. – 1997. – V. 7. – P.1181-1196.
5. **Mak Kinnan, J.A.** Mixing on the late-summer new England shelf-solibores, shear and stratification / J.A. Mak Kinnan, M.C. Gregg // *Preprint. AGU*, 1999 – V. 4. – 19 p.
6. **Muller, P.** Diapycnal mixing and internal waves / P. Muller, M. Briscoe // *Oceanography*. – 2000 – V. 13. – № 2. – P. 98-103.
7. **Reeder, D.B.** Very large subaqueous sand dunes on the upper continental slope in the South China Sea generated by episodic, shoaling deep-water internal solitary waves / D.B. Reeder, B.B. Ma, Y.J. Yang // *Marine Geology*. – 2011. – V. 279. – P.12–18.
8. **Талипова, Т.Г.** Моделирование динамики интенсивных внутренних волн на шельфе / Т.Г. Талипова, Е.Н. Пелиновский, А.А. Куркин, О.Е. Куркина // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 50. – № 6. – С. 714-722.
9. **Kurkina, O.E.** Propagation regimes of interfacial solitary waves in a three-layer fluid / O.E. Kurkina, A.A. Kurkin, E.A. Rouvinskaya, T. Soomere // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2015. – V. 22. – № 2. – P. 117-132.
10. **Song, Z.J.** Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses / Z.J. Song, B. Teng, Y. Gou, L. Lu, Z.M. Shi, Y. Xiao, Y. Qu // *Applied Ocean Research*. – 2011. – V. 33. – № 2. – P. 120-129.
11. **Рувинская, Е.А.** Перенос частиц при распространении бризеров внутренних гравитационных волн / Е.А. Рувинская, О.Е. Куркина, А.А. Куркин, А.А. Наумов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2015. – Т. 8. – № 3. – С. 53-61.
12. **Boyer, T. P.** World Ocean Atlas 2018 / T. P. Boyer, H. E. Garcia, R. A. Locarnini, M. M. Zweng, A.V. Mishonov, J.R. Reagan, K.A. Weathers, O.K. Baranova, D. Seidov, I.V. Smolyar // *NOAA National Centers for Environmental Information*. – 2018.
13. **Fox, D.N.** The Modular Ocean Data Assimilation System (MODAS) / D.N. Fox, W.J. Teague, C.N. Barron, M.R. Carnes, C.M. Lee // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2002. – V.19. – P. 240-252.
14. **Кокоулина, М.В.** О создании океанографической геоинформационной онлайн системы для расчета и анализа характеристик внутренних волн / М.В. Кокоулина // *Сборник материалов 33-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам*. – 2023.
15. **Тюгин, Д.Ю.** Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане / Д.Ю. Тюгин, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2011. – Т. 4. – № 2. – С. 32-44.
16. **Тюгин, Д.Ю.** Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013 / Д.Ю. Тюгин, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, О.Е. Куркина // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 89-95.
17. **Рувинская, Е.А.** Первая версия информационной системы обработки и анализа данных натурных измерений внутренних волн в океане / Е.А. Рувинская, А.С. Епифанова, М.В. Кокоулина // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. – 2020. – Т. 3(130). – С. 53-63.
18. **Grigorenko, K.S.** Internal Waves Kinematic Characteristics in the Central Atlantic in 2014–2015 / K.S. Grigorenko, S.M. Khartiev // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*

- (2018) 4th International Scientific School for Young Scientists, Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences. – Springer International Publishing, 2019. – P. 22-32.
19. **Grigorenko, K.S.** Investigations of Internal Waves in the Seas of Russia and in the Central Atlantic / K.S. Grigorenko, S.M. Khartiev // Conference on Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. – 2017. – P. 28-34.
  20. **Kurkina, O.** Vertical structure of the velocity field induced by mode-I and mode-II solitary waves in a stratified fluid / O. Kurkina, E. Rouvinskaya, A. Kurkin, A. Giniyatullin, E. Pelinovsky // The European Physical Journal E. 2018 – V. 41. – № 3. – P. 1-8.
  21. **Kurkin, A.A.** Modulation Instability Charts for Internal Waves / A.A. Kurkin, A.R. Giniyatullin, O.E. Kurkina, L.V. Talalushkina, T.G. Talipova // The Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017. – 2017. – P. 1259-1266.
  22. **Kurkina, O.** Mapping the internal wave field in the Baltic Sea in the context of sediment transport in shallow water / O. Kurkina, T. Talipova, E. Pelinovsky, T. Soomere // Journal of Coastal Research. – 2011. – P. 2042-2047.
  23. **Zhang, W.** Internal solitary waves control offshore extension of mud depocenters on the NW Iberian shelf / W. Zhang, I. Didenkulova, O. Kurkina, Y. Cui, J. Haberkern, R. Aepfler, A.I. Santos, H. Zhang, T.J. Hanebuth // Marine Geology. – 2019. – V. 409. – P. 15-30.
  24. **Kurkin, A.** Comparative analysis of the first baroclinic Rossby radius in the Baltic, Black, Okhotsk, and Mediterranean seas / A. Kurkin, O. Kurkina, A. Rybin, T. Talipova // Russian Journal of Earth Sciences. – 2020. – V. 20. – № 4. – P. 8.
  25. **Rouvinskaya, E.A.** Mapping of the Baltic Sea by the types of density stratification in the context of dynamics of internal gravity waves / E.A. Rouvinskaya, D.Y. Tyugin, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. – 2018. – V. 11. – № 1. – P. 46-51.
  26. **Kurkin, A.** Internal waves in the Mediterranean Sea: mapping and transformations / A. Kurkin, O. Kurkina, T. Talipova, E. Pelinovsky, E. Rouvinskaya // The Twelfth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2015. – 2015. – P. 836-846.
  27. **Kurkina, O.** Kinematic parameters of internal waves of the second mode in the South China Sea / O. Kurkina, T. Talipova, T. Soomere, A. Giniyatullin, A. Kurkin // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2017. – V. 24. – № 4. – P. 645-660.
  28. **Kurkina, O.** Propagation regimes and populations of internal waves in the Mediterranean Sea basin / O. Kurkina, E. Rouvinskaya, T. Talipova, T. Soomere // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2017. – V. 185. – P. 44-54.
  29. **Kurkina, O.** The impact of seasonal changes in stratification on the dynamics of internal waves in the Sea of Okhotsk / O. Kurkina, T. Talipova, T. Soomere, A. Kurkin, A. Rybin // Estonian Journal of Earth Sciences. – 2017. – V. 66. – № 4. – P. 238-255.
  30. **Grimshaw, R.** Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova, O. Kurkina // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2010. – V. 17. – № 6. – P. 633.
  31. **Egbert, G.D.** Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides / G.D. Egbert, S.Y. Erofeeva // Journal of Atmospheric and Oceanic technology. – 2002. – V. 19. – № 2. – P. 183-204.
  32. **Padman, L.** A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean / L. Padman, S. Erofeeva // Geophysical Research Letters. – 2004. – V. 31. – № 2.
  33. **Hamada, T.** Stratification potential-energy anomaly index standardized by external tide level / T. Hamada, S. Kim // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2021. – V. 250. – Art. No. 107138.
  34. **Ueno, H.** Stratification in the northern Bering Sea in early summer of 2017 and 2018 / H. Ueno, M. Komatsu, Z. Ji, R. Dobashi, M. Muramatsu, H. Abe, K. Imai, A. Ooki, T. Hirawake // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2020. – V. 181. – Art. No. 104820.
  35. **Ladd, C.** Stratification on the Eastern Bering Sea shelf revisited / C. Ladd, P.J. Stabeno // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2012. – V. 65. – P. 72-83.
  36. **Baines, P.G.** The generation of internal tides by flat-bump topography / P.G. Baines // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. – 1973. – V.20. – № 2. – P. 179-205.
  37. **Baines, P.G.** On internal tide generation models / P.G. Baines // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. – 1982. – V. 29. – № 3. – P. 307-338.

38. **Kokoulina, M.V.** Geographical and seasonal distribution of tidal body force field in the Sea of Okhotsk in the context of internal wave dynamics / M.V. Kokoulina, O.E. Kurkina, E.A. Rouvinskaya, A.A. Kurkin // Russian Journal of Earth Sciences. – 2022. – V. 22. – № 6. – Art. No. ES6013.
39. **Миропольский, Ю.З.** Динамика внутренних гравитационных волн в океане / Ю.З. Миропольский. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 302 с.
40. **Булатов, В.В.** О расчете собственных функций и дисперсионных кривых основной вертикальной спектральной задачи уравнения внутренних гравитационных волн / В.В. Булатов, Ю.В. Владимиров // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19. – № 2. – С. 59-67.
41. **Grimshaw, R.** Higher-order Korteweg-de Vries models for internal solitary waves in a stratified shear flow with a free surface / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, O. Poloukhina // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2002. – V. 9. – № 3-4. – P. 221-235.
42. **Grimshaw, R.** Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova, A. Kurkin // Journal of Physical Oceanography. – 2004. – V. 34. – № 12. – P. 2774-2791.
43. **Holloway, P.E.** A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West shelf / P.E. Holloway, E.N. Pelinovsky, T.G. Talipova, B. Barnes // Journal of Physical Oceanography. – 1997. – V. 27. – № 6. – P. 871-896.
44. **Wang, W.** Distinct Variability between Semidiurnal and Diurnal Internal Tides at the East China Sea Shelf / W. Wang, R. Robertson, Y. Wang, C. Zhao, Z. Hao, B. Yin, Z. Xu // Remote Sensing. – 2022. – V. 14. – № 11. – Art. No. 2570.

*Дата поступления  
в редакцию: 16.05.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 07.07.2023*