

Геоинформатика. 2023. № 2. С. 26–31.
Geoinformatika. 2023;(2):26–31.

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Научная статья
 УДК 004.94

<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-26-31>

Моделирование поля течений и уровня моря с применением программного комплекса Cardinal

© 2023 г. — Е.П. Истомин^{а)}, Я.А. Петров^{б)}, И.А. Мартын^{в)}

ФГБОУ ВО Российский Государственный Гидрометеорологический Университет; Россия, Санкт-Петербург

^{а)}biom@bk.ru, ^{б)}yaroslav.petrov025@gmail.com, ^{в)}irma_martyn@mail.ru

Аннотация: В статье описывается применение программного комплекса Cardinal для моделирования течений и уровня моря на прямоугольной и криволинейной сетке с заданием топографических данных. Расчет производится на 1 сутки для акватории Красного моря при задании ветра 5 м/с и данных о приливных колебаниях в течение 10 суток. Результаты моделирования представлены в картографическом виде с представлением колебаний векторов осредненной по глубине скорости течений при приливах в Красном море.

Ключевые слова: *геомоделирование, поле течений, геоинформационные системы*

Для цитирования: Истомин Е.П., Петров Я.А., Мартын И.А. Моделирование поля течений и уровня моря с применением программного комплекса Cardinal // *Геоинформатика*. — 2023. — № 2. — С. 26–31. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-26-31>.

Modeling of geological objects and geoproceses

Original article

Modeling of the field of currents and sea level using the Cardinal software package

© 2023 — E.P. Istomin^{а)}, Ya.A. Petrov^{б)}, I.A. Martyn^{в)}

Russian State Hydrometeorological University; Saint-Petersburg, Russia

^{а)}biom@bk.ru, ^{б)}yaroslav.petrov025@gmail.com, ^{в)}irma_martyn@mail.ru

Abstract: The article describes the application of the Cardinal software package for modeling currents and sea level on a rectangular and curved grid with the assignment of topographic data. The calculation is made for 1 day for the Red Sea area when the wind is set to 5 m/s and data on tidal fluctuations for 10 days. The simulation results are presented in cartographic form with a representation of the fluctuations of the vectors of the depth-averaged flow velocity at tides in the Red Sea.

Key words: *geomodeling, flow field, geoinformation systems*

For citation: Istomin E.P., Petrov Ya.A., Martyn I.A. Modeling of the field of currents and sea level using the Cardinal software package. *Geoinformatika*. 2023;(2):26–31. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-2-26-31>. In Russ.

Явления окружающей среды можно исследовать путем создания математических моделей. Такие модели создаются с применением основных принципов физики. Эти явления содержатся в математической физике и взаимосвязаны с принципами математической модели. Ни одна математическая модель не может считаться абсолютным аналогом изучаемого процесса, но благодаря ей можно приближенно понять суть этого процесса. Для достижения требуемого результата исследования необходимо применять модель, максимально полно описывающую изучаемый физический процесс. Для этого разрабатываются гидродинамические математические модели. Сама математическая модель способна охватить изолированную структуру уравнений. При этом численный состав этих уравнений должен соответствовать количеству неизвестных величин [6, 7, 8].

Программный комплекс Cardinal позволяет создавать гидродинамические модели водных объектов в двух и трехмерном приближении для нестационарной динамики вод, расчета течений, штормовых нагонов и др. Программный комплекс содержит пре-процессор (ввод исходных данных), процессор (блок расчета) и пост-процессор (визуализация результатов).

Система уравнений, решаемая в программном комплексе методом конечных разностей имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\xi} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz -$$

$$- \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_0}{\partial x} + fv + K \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial u}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz -$$

$$- \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_0}{\partial y} + fu + K \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial v}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma_x,$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = \omega_s,$$

где u, v, w — декартовы компоненты вектора скорости течения; g — ускорение силы тяжести, ζ — уровень свободной поверхности [7].

На дне при $z = -h(x, y)$ задается касательное напряжение трения с помощью квадратичного закона. Для ветровых условий касательное напряжение трения на поверхности также задается с помощью квадратичного закона.

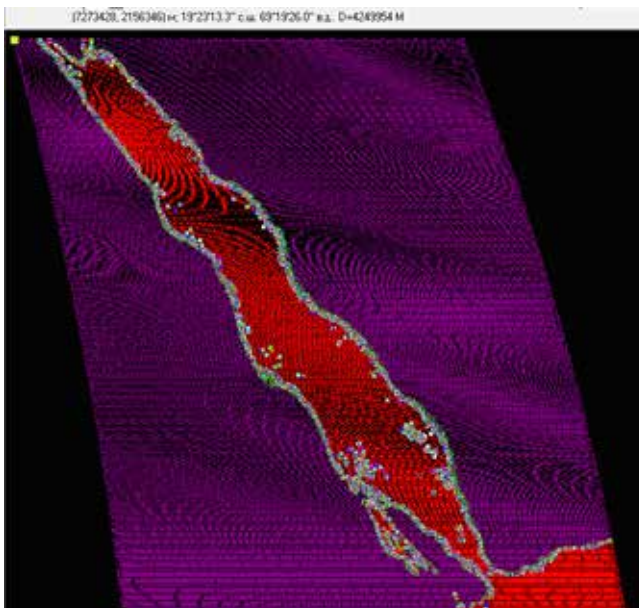
На твердых боковых границах нормальная компонента скорости u равна нулю. На открытых боковых границах граничное условие может быть различных типов [1, 2].

Исходные данные массива глубин Красного моря были взяты с сайта NOAA. Полученный массив импортируется в программный комплекс с изменением единиц измерения на градусы. На сетке используется 100 узлов.

Изменяем знак элементов массива глубины на отрицательный, так как значения глубин в массиве данных имеют абсолютные значения (рис. 2).

Рис. 1. Ввод исходных данных

Fig. 1. Entering initial data



После интерполяции импортированного массива глубин на расчетную сетку производится задание ветровых параметров 5 м/с и шага по времени. Выполняем расчет до установления поля течений, в результате получаем поле течений при ветре 5 м/с (рис. 3).

При использовании криволинейной сетки производится загрузка данных (рис. 1, 2) и постановка 101 узла (рис. 4).

По нулевой изобате проводится замкнутый контур области. Выделяются связанные отрезки. После этого береговой контур, изначально окрашенный в красный цвет, окрашивается в зеленый цвет — это говорит о том, что процедура проведена правильно.

Поставим в четырех отдельных точках контура номера угловых точек (рис. 6).

Таким образом созданы границы сетки, при этом произведена постановка береговых точек сетки. После генерации расчетной сетки производится интерполяция импортированного массива глубин на расчетную сетку [3, 5].

С использованием данных о приливных колебаниях в Красном море за 10 суток во вкладке «Время» было установлено начальное и текущее время с выбором шага по времени, установлением открытой границы (рис. 8) и поставлено два мореграфа на двух противоположных границах акватории для получения данных об уровне (рис. 9).

Рис. 2. Пространственное распределение исходных данных после смены h на $-h$

Fig. 2. Spatial distribution of initial data after changing h to $-h$

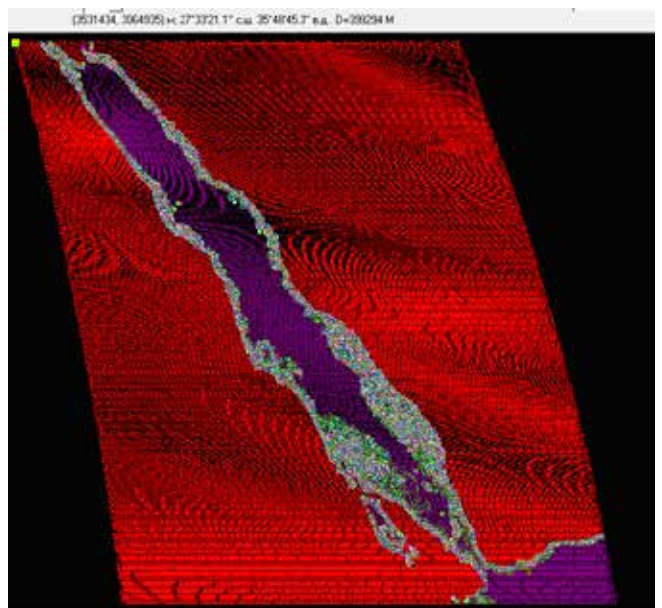


Рис. 3. Поле течений на прямоугольной сетке
 Fig. 3. The field of currents on a rectangular grid

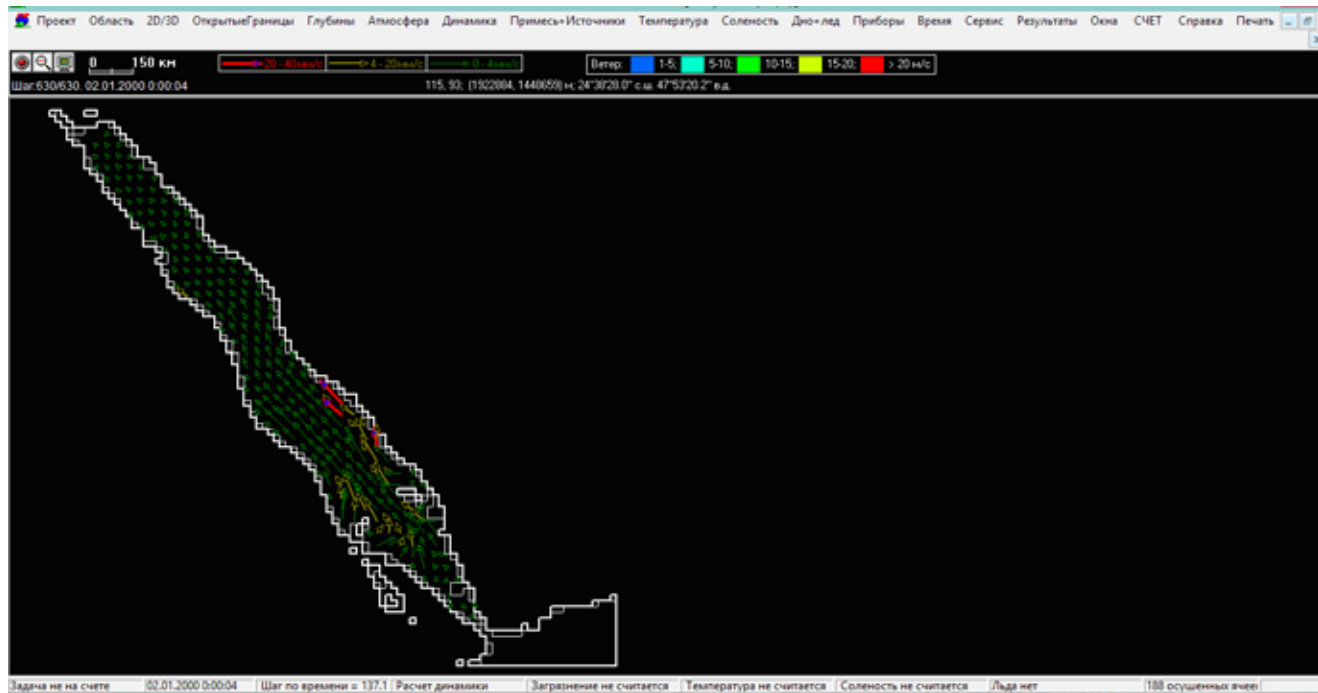


Рис. 4. Постановка 101 узла
 Fig. 4. Setting 101 knots

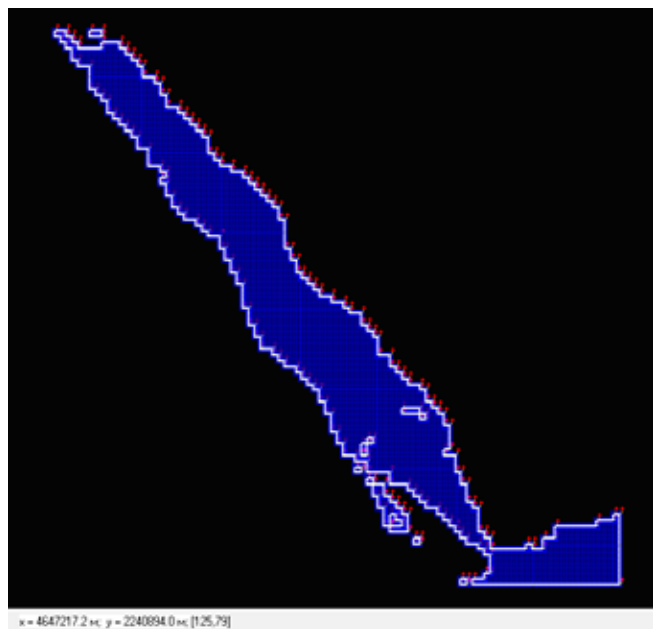
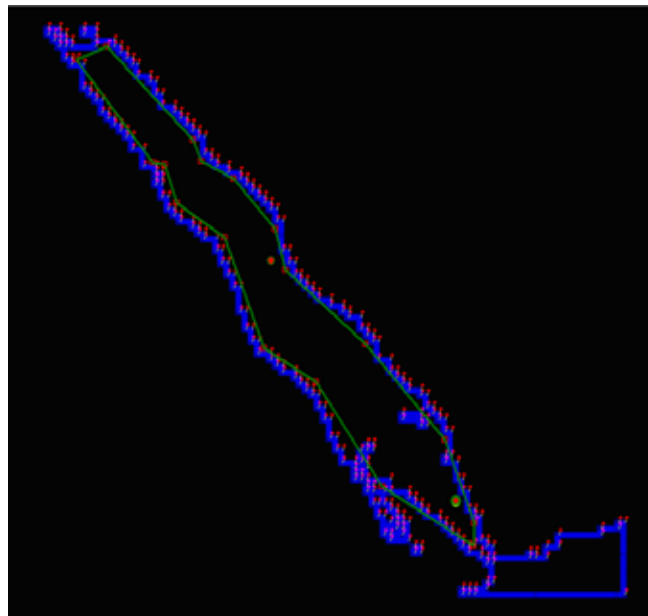


Рис. 5. Создание границ криволинейной сетки
 Fig. 5. Creating the boundaries of a curved mesh



Был выполнен расчет поля течений и уровня Красного моря на одни сутки в зависимости от приливных колебаний (рис. 10, 11).

После интерполяции глубин можно заметить, что наибольшие глубины в Красном море располагаются в центральной части моря и составляют порядка 2 км (рис. 7).

На рис. 10 представлен уровень Красного моря и скорость течения при ветре 5 м/с. Уровень моря максимален у открытой границы (открытая граница представлена на рис. 8), в южной части моря уровень также максимален и постепенно убывает к северной части моря. На цветовой шкале оранжевым цветом показана наименьшая глубина, кото-

Рис. 6. Криволинейная сетка Красного моря
Fig. 6. Curvilinear grid of the Red Sea

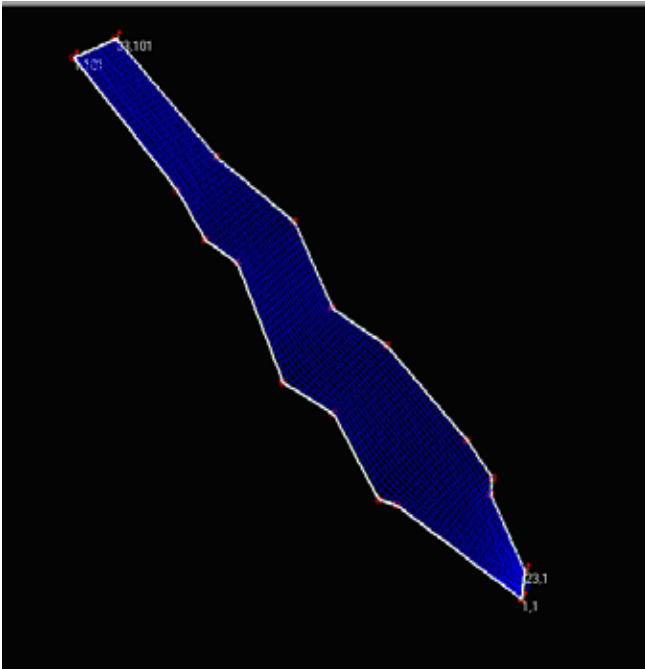


Рис. 7. Интерполяция глубин Красного моря
Fig. 7. Red Sea depth interpolation

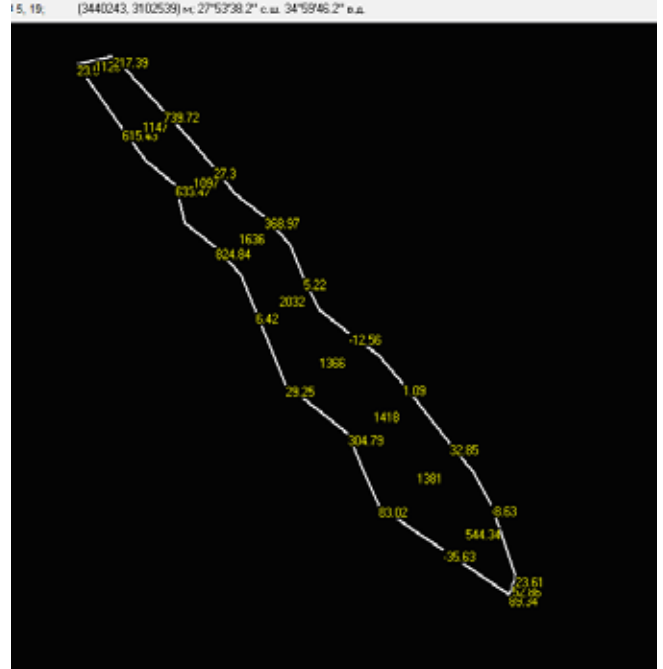


Рис. 8. Установка открытой границы
Fig. 8. Setting an open border

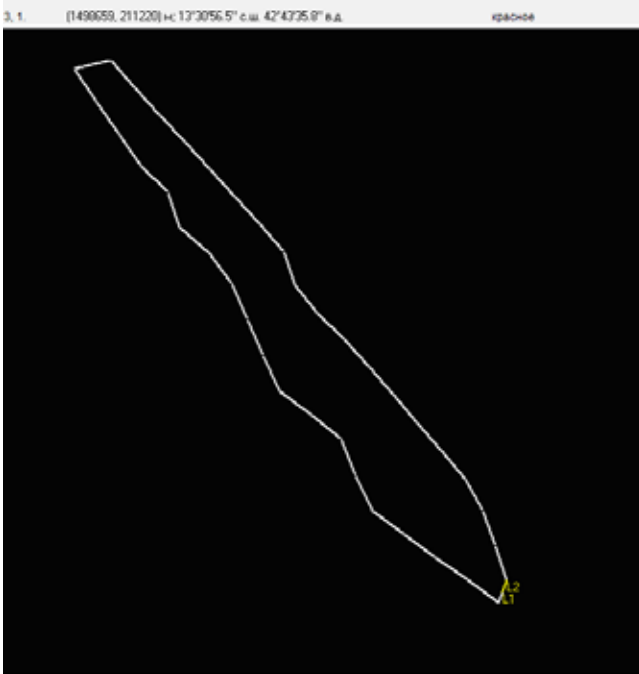
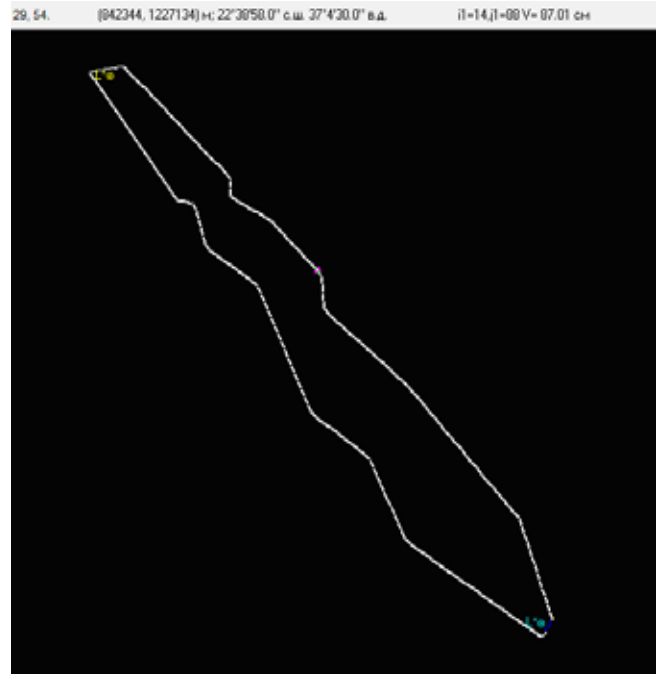


Рис. 9. Установка двух мореграфов
Fig. 9. Installation of two seagraps



рая обусловлена нахождением в данной части моря небольшой группы островов. Скорость течения небольшая по всей акватории Красного моря и составляет 0–3 см/с, наибольшая скорость наблюдается за островом у западного побережья, а так же на восточном побережье по той же параллели и состав-

ляет 15–30 см/с. Скорости течений в юго-западной и юго-восточной части моря менее 3–15 см/с. В итоге наибольшие скорости наблюдаются в южной части Красного моря, в северной части моря скорости малы и распределение скоростей течений однородно. На рис. 11 произведено построение

Рис. 10. Скорость течения и изолинии уровня Красного моря при ветре 5 м/с
 Fig. 10. Current velocity and isolines of the Red Sea level at a wind of 5 m/s

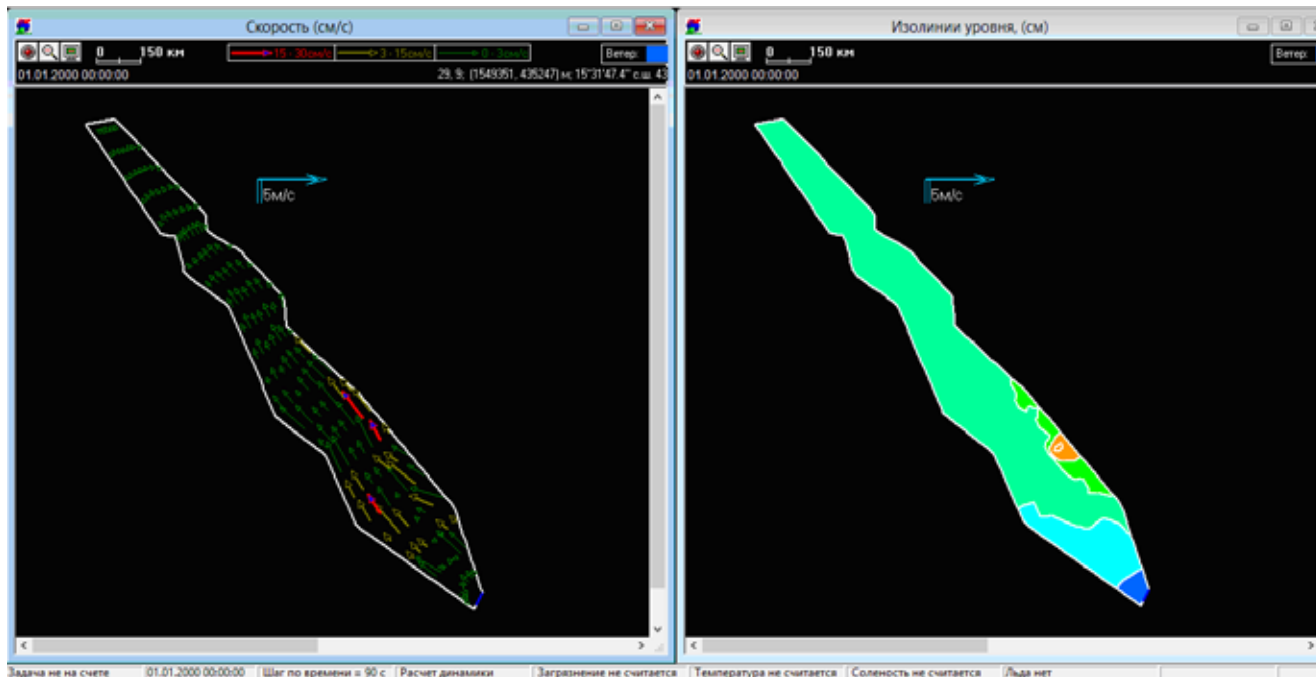
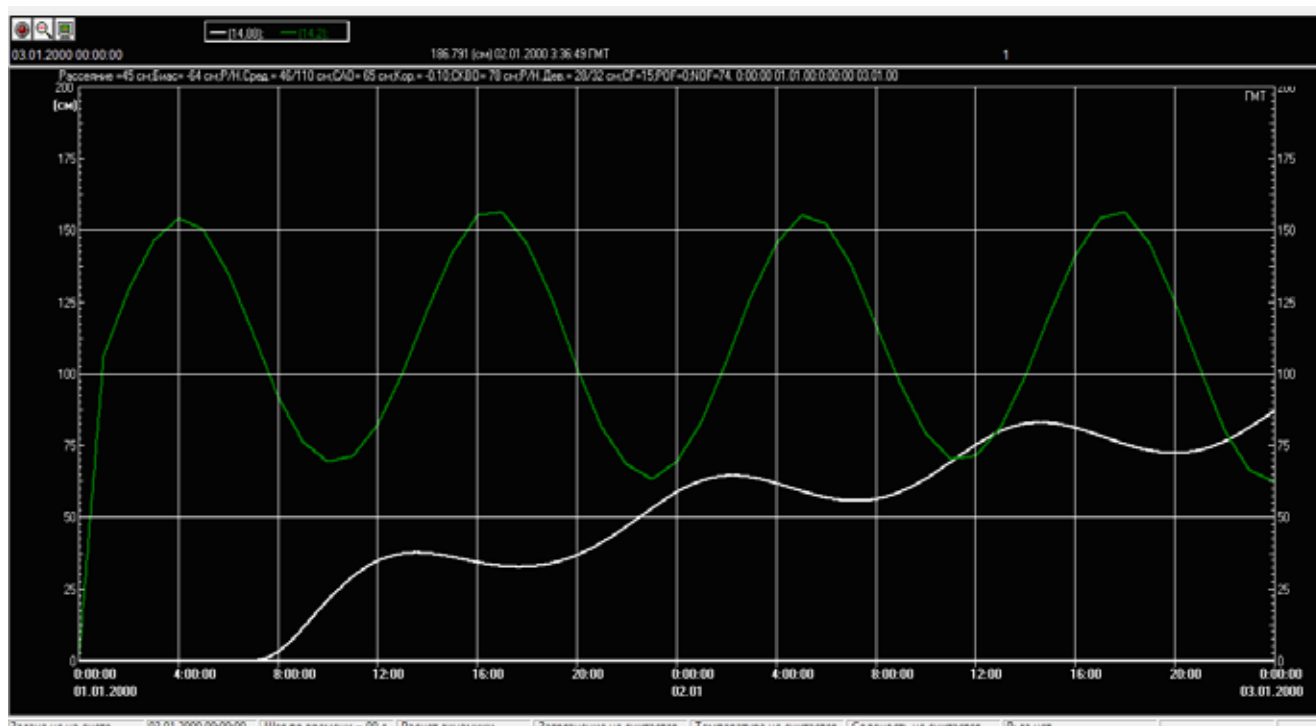


Рис. 11. Прилив и уровень Красного моря
 Fig. 11. Tide and Red Sea level



хода приливного уровня; прилив в Красном море имеет полусуточный характер и величина прилива составляет чуть более 150 см.

В заключение отметим, что программный комплекс Cardinal в достаточно полном объеме моде-

лирует поля течений при учете рельефа дна и глубины моря. В дальнейшем на основе полученных результатов будет произведено моделирование разлива нефти и рассмотрена трансформация нефтяного пятна в Красном море [4].

Список источников

1. Гилл А. Динамика атмосферы и океана/ Пер. с англ. В.Н. Рябикина, А.Н. Филатова. – Т. 1. – М. : Мир, 1986. – 396 с.
2. Истомин Е.П., Михеев В.Л., Петров Я.А., Мартын И.А. Геомоделирование предельного усиления цуга волн при выходе на шельф // Информатика и космос. – 2021. – № 3. – С. 78–85.
3. Истомин Е.П., Михеев В.Л., Петров Я.А., Мартын И.А. Моделирование волновых процессов на замкнутых акваториях мелководных районов // Геоинформатика. – 2021. – № 3. – С. 30–35. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-3-30-35.
4. Мартын И.А., Царёв В.А., Кузнецова М.Н. Моделирование волновой обстановки на защищенной акватории порта // Комплексные исследования Мирового океана : материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых (Калининград, 18–22 мая 2020 г.). – Калининград : АО ИО РАН, 2020. – С. 431–432.
5. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика: в 2-х т. / Пер. с англ. Г.М. Резника, Т.Б. Цыбаневой. – М. : Мир, 1984. – 398, 416 с.
6. Istomin E., Martyn I., Petrov Y., Stepanov S., Sidorenko A. Development of a mathematical model of wind waves in the area of the proposed construction of a hydraulic structure // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 723. – No 5. – 052030. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052030.
7. Istomin E., Martyn I., Petrov Y., Stepanov S., Sidorenko A. Study of intra-day dynamics of currents in the area of the navigable strait of Baltiysk to adjust the movement of water transport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 817. – 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012013.
8. Martyn I., Petrov Y., Stepanov S., Sidorenko A. Modeling of sea currents and the spread of an oil slick in the Labrador sea area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 723. – No. 5. – 052035. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052035.

References

1. Gill A. Atmosphere-Ocean Dynamics. New York: Academic Press; 1982. 680 p.
2. Istomin E.P, Mikheev V.L., Petrov Ya.A., Martyn I.A. Geomodeling of the limiting amplification of the wave train at the exit to the shelf. *Information and Space*. 2021;(3):78-85.
3. Istomin E.P, Mikheev V.L., Petrov Ya.A., Martyn I.A. Modeling of wave processes in closed water areas of shallow water areas. *Geoinformatika*. 2021;(3):30-35. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-3-30-35.
4. Martyn I.A., Tsarev V.A., Kuznetsova M.N. Modelirovanie volnovoï obstanovki na zashchishchennoï akvatorii porta [Modeling of the wave situation in the protected water area of the port]. In: Kompleksnye issledovaniya Mirovogo okeana : materialy V Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh (Kaliningrad, 18–22 May 2020). Kaliningrad: AO IO RAN; 2020. pp. 431–432.
5. Pedlosky J. Geophysical Fluid Dynamics. New York; Springer-Verlag: 1982. 626 p.
6. Istomin E., Martyn I., Petrov Y., Stepanov S., Sidorenko A. Development of a mathematical model of wind waves in the area of the proposed construction of a hydraulic structure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723(5):052030. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052030.
7. Istomin E., Martyn I., Petrov Y., Stepanov S., Sidorenko A. Study of intra-day dynamics of currents in the area of the navigable strait of Baltiysk to adjust the movement of water transport. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;817:012013. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012013.
8. Martyn I., Petrov Y., Stepanov S., Sidorenko A. Modeling of sea currents and the spread of an oil slick in the Labrador sea area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723(5):052035. DOI: 10.1088/1755-1315/723/5/052035.

Статья поступила в редакцию 19.12.2022, одобрена после рецензирования 25.03.2023, принята к публикации 01.04.2023.
The article was submitted 19.12.2022; approved after reviewing 25.03.2023; accepted for publication 01.04.2023.

Информация об авторах

Истомин Евгений Петрович

Доктор технических наук, профессор, директор института Информационных систем и геотехнологий ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»
192007 Санкт-Петербург, Воронежская улица, д. 79
ORCID ID: 0000-0001-6247-4373
e-mail: biom@bk.ru

Петров Ярослав Андреевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры Прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»
192007 Санкт-Петербург, Воронежская улица, д. 79
ORCID ID: 0000-0002-9185-441X
e-mail: yaroslav.petrov025@gmail.com

Мартын Ирма Андреевна

Старший преподаватель кафедры Прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»
192007 Санкт-Петербург, Воронежская улица, д. 79
ORCID ID: 0000-0002-4332-7308
e-mail: irma_martyn@mail.ru

Information about authors

Eugene P. Istomin

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Information Systems and Geotechnologies Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., Saint Petersburg, 192007, Russia
ORCID ID: 0000-0001-6247-4373
e-mail: biom@bk.ru

Yaroslav A. Petrov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Applied Informatics Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., Saint Petersburg, 192007, Russia
ORCID ID: 0000-0002-9185-441X
e-mail: yaroslav.petrov025@gmail.com

Irma A. Martyn

Senior Lecturer of the Department of Applied informatics Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., Saint Petersburg, 192007, Russia
ORCID ID: 0000-0002-4332-7308
e-mail: irma_martyn@mail.ru