

Моделирование волновых процессов на замкнутых акваториях мелководных районов

© 2021 г. — Е.П. Истомин, В.Л. Михеев, Я.А. Петров, И.А. Мартын

ФГБОУ ВО Российский Государственный Гидрометеорологический Университет; Россия, Санкт-Петербург; biom@bk.ru, rector@rshu.ru, yaroslav.petrov025@gmail.com, irma_martyn@mail.ru

Поступила 26.04.2021 г.

Принята к печати 20.08.2021 г.

Ключевые слова: математическое моделирование, нестационарная двухмерная модель, ветровое волнение, замкнутая акватория, мелководный район.

Аннотация: В статье представлена разработанная нестационарная двухмерная гидростатическая модель распространения волнения на акватории порта бухты Пяти Охотников, защищенного берегозащитным сооружением в виде мола. В задачи работы входила разработка модели, основанной на уравнениях Навье-Стокса и неразрывности, и дальнейшая оценка возможного влияния волновой обстановки на морские объекты на акватории порта. В настоящее время обеспечение морской деятельности гидрометеорологической прогностической информацией является одним из важнейших факторов эффективной работы портовых акваторий. Результаты представляются в графическом виде с применением геоинформационной системы, где с помощью цветовой палитры отображается различная высота волн и максимальная амплитуда волн. Показана непротиворечивость полученных расчетов физическим законам, для поступающего волнового фронта отмечается рефракция, дифракция и интерференция.

Для цитирования: Михеев В.Л., Истомин Е.П., Мартын И.А., Петров Я.А. Моделирование волновых процессов на замкнутых акваториях мелководных районов // Геоинформатика. – 2021. – № 3. – С. 31–35. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-3-30-35.

Modeling of wave processes in closed water areas of shallow water areas

© 2021 — E.P. Istomin, V.L. Mikheev, Y.A. Petrov, I. A. Martyn

Russian State Hydrometeorological University; Russia, Saint-Petersburg; biom@bk.ru, rector@rshu.ru, yaroslav.petrov025@gmail.com, irma_martyn@mail.ru

Received 26.04.2021

Accepted for publication 20.08.2021

Key words: mathematical modeling, non-stationary two-dimensional model, wind wave, closed water area, shallow water area.

Abstract: The article presents the developed non-stationary two-dimensional hydrostatic model of wave propagation in the water area of the port of the Bay of Five Hunters, protected by a coastal protection structure in the form of a jetty. The tasks of the work included the development of a model based on the Navier-Stokes and continuity equations and a long-range assessment of the possible impact of the wave situation on marine objects in the port area. At present, the provision of hydrometeorological predictive information is one of the most important factors in the effective operation of port waters. The results are presented graphically using a geographic information system, where different wave heights and maximum wave amplitudes are displayed using a color palette. The consistency of the obtained results is shown, and refraction, diffraction, and interference are noted for the incoming wavefront.

For citation: Mikheev V.L., Istomin E.P., Martyn I. A., Petrov Y.A. Modeling of wave processes in closed water areas of shallow water areas *Geoinformatika*. 2021;(3):31–35. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-3-30-35. In Russ.

Введение

Сложность получения достоверных данных о характеристиках ветрового волнения затрудняет прогнозирование ветрового волнения и, следовательно, оценку его влияния на гидротехнические сооружения. Математическое моделирование является актуальным решением данной проблемы [1, 2, 6, 8], особенно для обеспечения портовой деятельности и деятельности в прибрежной зоне, ведь дан-

ный способ позволяет, имея минимум данных, смоделировать различные характеристики волнения, их развитие и влияние на объекты хозяйственной деятельности [3].

В связи с постройкой порта в бухте Пяти Охотников, где довольно высока частота штормовых нагонов, возникла потребность в строительстве берегозащитного сооружения в виде мола и оценке его эффективности. Ранее исследований для данного

района не проводилось. Цель исследования заключалась в создании гидродинамической модели распространения ветрового волнения на акватории порта, защищенного молом. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: определение пространственно-временной изменчивости ветрового волнения акватории порта, расчет и анализ пространственного распределения основных характеристик ветровых волн — высоты и максимальной амплитуды, анализ эффективности построения берегозащитного сооружения.

$$\xi = \xi_0 \cos(kx - \sigma t), \quad (1)$$

где ξ — возмущение уровня, ξ_0 — амплитуда волнения, k — волновое число, σ — угловая частота.

Расчет распространения ветрового волнения производится по нестационарной двумерной модели, в которой для расчета возмущений уровня поверхности используется система уравнений в приближении Буссинеска (уравнения движения и уравнения неразрывности):

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= -g \frac{d\xi}{dx} \\ \frac{dv}{dt} &= -g \frac{d\xi}{dy} \\ \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} &= -\frac{k}{th(kh)} \frac{d\xi}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где u, v — составляющие скорости по направлениям осей x и y ; h — глубина моря, ξ — возмущение уровня поверхности, g — ускорение силы тяжести, k — волновое число.

Система уравнений решается методом конечных разностей на смещенной прямоугольной сетке. При аппроксимации производных по оси прямо направленными разностями получаем системы уравнений

$$\begin{aligned} u_{i,j} &= u_{i,j} - g \frac{dt}{dx} (\xi_{i,j} - \xi_{i-1,j-1}) \\ v_{i,j} &= v_{i,j} - g \frac{dt}{dy} (\xi_{i,j} - \xi_{i-1,j-1}) \\ \xi_{i,j} &= \xi_{i,j} - \frac{th(kh)}{k} \frac{dt}{dl} ((u_{i+1,j+1} - u_{i,j}) + \\ &+ (v_{i+1,j+1} - v_{i,j})) + q_0 \sin\left(\frac{2\pi}{Tt}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $dl = d(x, y)$, T — период, q_0 — фиктивный источник.

На твердых боковых границах устанавливается граничное условие в виде условия непротекания:

$$(U \cdot n) = 0, \quad (4)$$

где U — вектор скорости, n — нормаль к боковой границе.

На жидкой боковой границе устанавливается условие пропускания, заданное с помощью импедансного соотношения:

$$u = \frac{g}{c} \xi, \quad (5)$$

где c — фазовая скорость.

На поверхности задавалось отсутствие касательного напряжения трения ветра:

$$\tau_{0x} = \rho_0 K_u \left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = 0, \quad (6)$$

где τ — составляющая касательного напряжения трения на поверхности.

На дне задается условие прилипания для горизонтальных составляющих скорости:

$$\rho_0 K_u \left. \frac{du}{dz} \right|_{z=H} = \tau_{hx}, \quad (7)$$

где τ_{hx} — составляющая касательного напряжения трения у дна [4].

Исходными данными модели является массив глубин для расчетной сетки (рис. 1), параметры поступающего волнения задаются с помощью фиктивного точечного источника на открытой границе, формирующего прогрессивную волну высотой 0,5 м, интенсивность менялась с периодом 5 секунд. Фиктивный источник формирует волны, наиболее часто возникающие в окрестности исследуемого порта по данным гидрометеорологических наблюдений. Выходные данные модели — полученные характеристики волнения (высота волн и амплитуда).

При решении данной задачи использовалась прямоугольная сетка размерами 420x385 узлов с шагом по вертикали 2 м и 1 м по горизонтали. На рис. 1 отмечено расположение берегозащитного сооружения (мола), который в данной модели используется в качестве твердой стенки, также показано направление распространения входящих волн, на входе в порт используется условие жидкой границы.

Результаты

Расчет проводился до полного установления волнения на акватории. По результатам расчетов были построены карты пространственно-временной изменчивости высот волн спустя 1, 6, 12 и 30 минут (рис. 2–5).

Максимальная амплитуда ветровых волн на акватории была рассмотрена при осреднении в рамках временного интервала блока с шагом по времени 1000 секунд. Для выявления районов порта с наибольшей концентрацией ветровых волн с максимальной амплитудой были построены карты пространственного распространения максимальных амплитуд ветрового волнения при осреднении на временном шаге 1000, 20000 и 100000 секунд (рис. 6–8).

Рис. 1. Карта глубин бухты Пяти Охотников (м) с указанием расположения берегозащитного сооружения (мола) на акватории порта и с указанием направления распространения поступающих волн

Fig. 1. Map of the depths of the Five Hunters Bay (m), indicating the location of the coastal protection structure (mole) in the port water area and indicating the direction of propagation of incoming waves

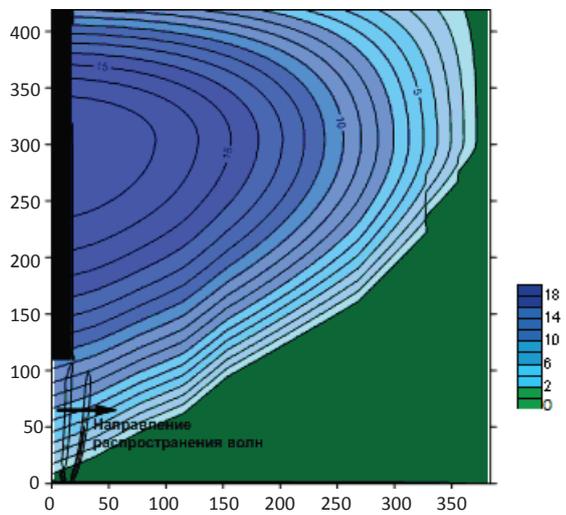


Рис. 2. Карта распространения высоты волнения (мм) спустя 1 минуту

Fig. 2. Wave height propagation map (cm) after 1 minute

Рис. 3. Карта распространения высоты волнения (мм) спустя 6 минут

Fig. 3. Wave height propagation map (cm) after 6 minutes

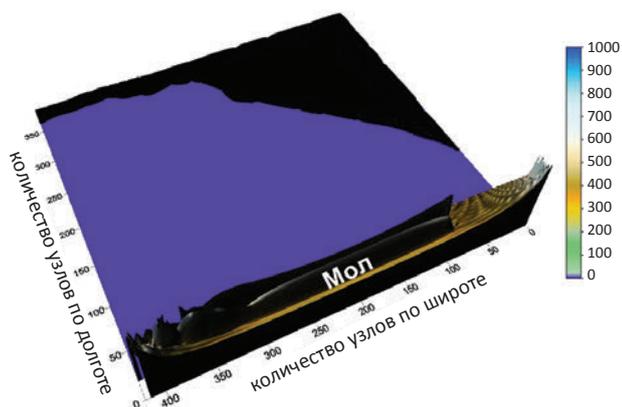


Рис. 4. Карта распространения высоты волнения (мм) спустя 12 минут

Fig. 4. Wave height propagation map (cm) after 12 minutes

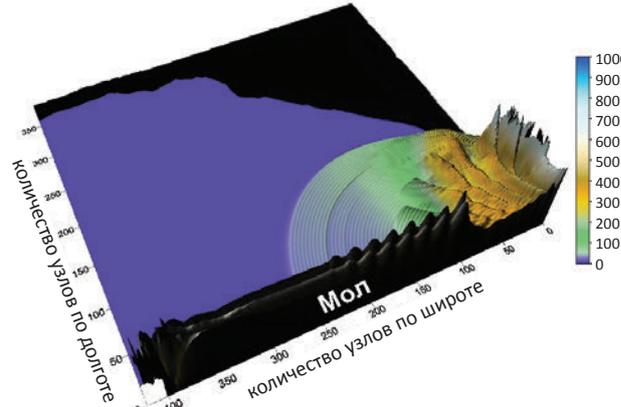
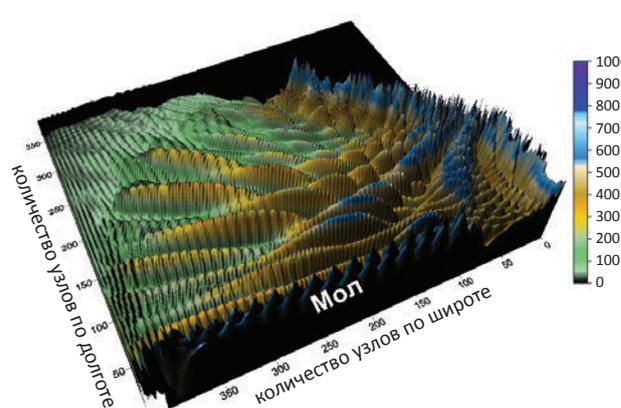
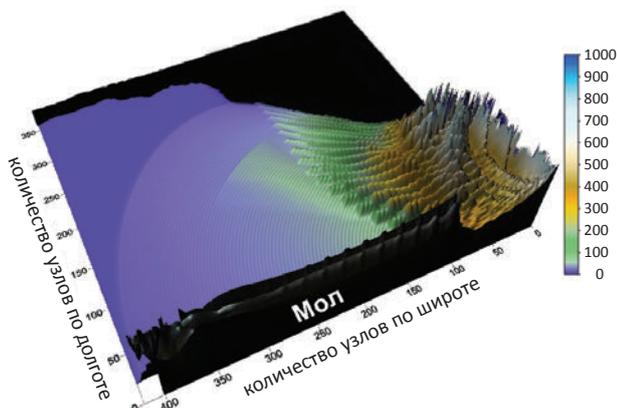


Рис. 5. Карта распространения высоты волнения (мм) спустя 30 минут

Fig. 5. Wave height propagation map (cm) after 30 minutes



Обсуждение результатов

По результатам расчетов в начальный момент времени входящий волновой фронт претерпевает трансформацию (рис. 2), фронт разворачивается в связи с распределением глубин на акватории. Достигая берега, волны подходят к нему по нормали (рис. 3, 4), отражаются и распространяются далее по акватории; таким образом, наблюдается классическая картина рефракции, которая повторяется, когда фронт волн достигает твердой границы. В полученных результатах также можно отметить явление дифракции [4, 6]. При входе волн в акваторию хорошо отделяются зоны света и тени, которые находятся за молом (рис. 3). Наилучшим местом для стоянки судов считается зона тени из-за наименьшего влияния волнения на стоящие в порту суда [5]. Было определено, что для полного установления волнения понадобилось менее 30 минут. Картина установившегося волнения имеет сложную ячеистую структуру с уменьшением высоты волны к периферии ячейки (рис. 5). В результате расчетов максимальная высота волны составила чуть более 1 м. Наибольшие высоты волн наблюдаются у твердых границ и в центре акватории порта, вследствие схождения отраженных от твердых границ волн.

Максимальная амплитуда ветровых волн на акватории была рассмотрена при осреднении во временном интервале с шагом осреднения по времени 1000 секунд. Для выявления районов порта с наибольшей концентрацией ветровых волн с максимальной амплитудой были построены карты пространственного распространения максимальных амплитуд ветрового волнения при осреднении на временном шаге 1000, 20000 и 100000 секунд (рис. 6–8).

На рис. 6 видно, что максимальная амплитуда наблюдается у твердых границ и у берега рядом с входом в порт достигает 1 м. На большей части взволнованной поверхности амплитуда составляет около 70–80 см, дальше от прохода в акваторию порта амплитуда уменьшается и меняется от 40 до 10 см у крайних волн.

На рис. 7 волны распространены практически на всей акватории. Максимальные амплитуды наблюдаются у берега при входе в порт и составляют 1 м, здесь наблюдается большое скопление волновой энергии, что также приводит к наличию большого числа волн с амплитудой около 80 см. На большей части исследуемой акватории, особенно вдоль берегозащитного сооружения, наблюдается волнение с амплитудой примерно 50 см. Наименьшие амплитуды отмечаются в центральной части акватории порта и составляют 10 см.

После установления волнения картина имеет более сложный характер, еще большая часть акватории охвачена волнами с амплитудами около 60 см, максимальное значение высоты волн около 1,5 м. Остальная масса значений составляет 40 см в сред-

Рис. 6. Пространственное распределение максимальной амплитуды ветровых волн (мм) на временном шаге 1000 секунд
Fig. 6. Spatial distribution of the maximum amplitude of wind waves after 1000 seconds

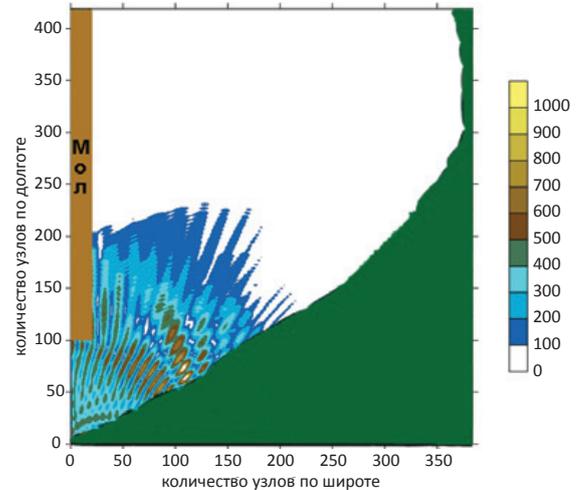


Рис. 7. Пространственное распределение максимальной амплитуды спустя 20000 секунд
Fig. 7. Spatial distribution of the maximum amplitude after 20,000 seconds

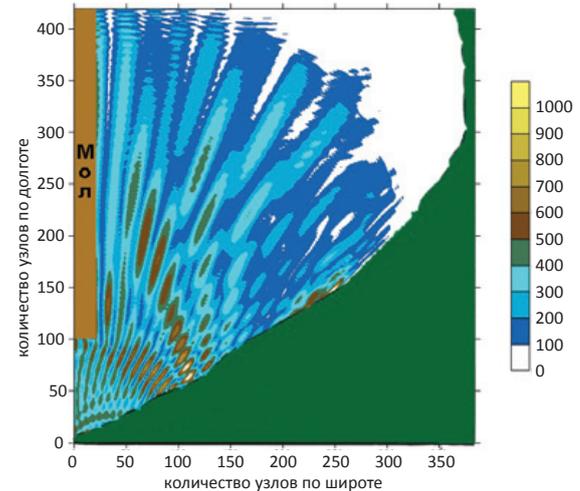
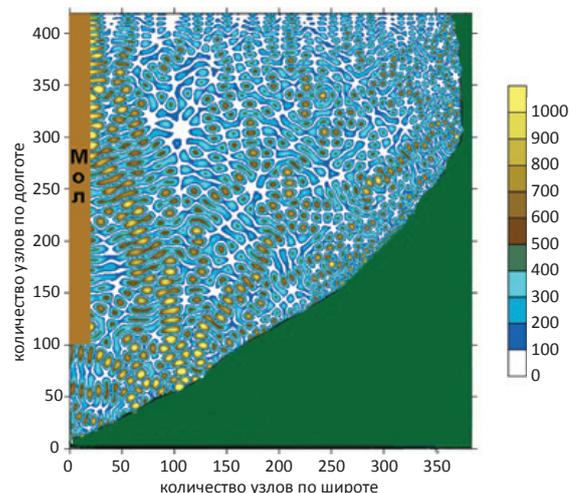


Рис. 8. Пространственное распределение максимальной амплитуды спустя 100 000 секунд
Fig. 8. Spatial distribution of the maximum amplitude after 100,000 seconds



нем (рис. 8). Концентрация ветровых волн с максимальной высотой около 1 м происходит у входа в акваторию порта и в центральной части на последних этапах расчета, где наблюдается наибольшее скопление волновой энергии.

Заключение

По результатам расчетов можно сделать вывод о том, что берегозащитные сооружения оказывают влияние на волнение в пределах акватории порта, уменьшая высоту волн и снижая влияние на

портовые объекты. Представленная модель расчета распространения волнения на акватории порта показывает картину распространения волнения на акватории и позволяет рассчитать основные параметры волнения. Полученные результаты модели не противоречат физическим законам [5, 9, 13]. Для автоматизации расчетов и снижения времени реагирования целесообразно внедрить данную модель в аналитическую ГИС поддержки принятия решений [7, 10, 11].

Список литературы

1. Вагизов М.Р., Истомин Е.П., Колбина О.Н., Кочнев А.С., Михеев В.Л., Яготинцева Н.В. Механизм обучения нейронной сети для прогноза метеорологической обстановки при использовании ГИС // Геоинформатика. – 2021. – № 1. – С. 22–29.
2. Вагизов М.Р., Степанов С.Ю., Петров Я.А., Сидоренко А.Ю. Методика дешифрирования и инвентаризации лесных насаждений средствами ГИС Autocad Map // Геоинформатика. – 2020. – № 4. – С. 20–27.
3. Гилл А. Динамика атмосферы и океана / Пер. с англ. В.Э. Рябиной, А.Н. Филатова. – Т. 1. – М.: Мир, 1986. – 396 с.
4. Динамика океана / Под ред. Ю.П. Дорониной. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 304 с.
5. Доронин Ю.П. Океанография шельфовой зоны. – СПб.: РГГМУ, 2007. – 128 с.
6. Истомин Е.П., Кирсанов С.А., Соколов А.Г., Колбина О.Н. Феномен геоинформационного управления и принципы его реализации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2014. – № 4. – С. 180–188.
7. Истомин Е.П., Петров Я.А., Истомин И.Е. Современные подходы к разработке ГИС // ИНФОГЕО-2018. Стратегическое управление развитием территорий. Сборник трудов V международной научно-практической конференции «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий» (Санкт-Петербург, 29–30 ноября 2018 г.). – СПб.: РГГМУ, 2018. С. 268–271.
8. Истомин Е.П., Слесарева Л.С. Применение стохастических моделей для прогнозирования рисков в геосистемах // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 17. – С. 145–149.
9. Мартын И.А. Моделирование распространения волнения на акватории порта // Морские исследования и образование (MARESEDU-2018). Труды VII Международной научно-практической конференции (Москва, 19–22 ноября 2018 г.). – Тверь: Полипресс, 2019. – Т. 3 (4). – С. 159–166.
10. Петров Я.А. Научно-технические основы управления георисками в природно-технических системах // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве. Материалы II молодежной международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2018 г.). – СПб.: Полиграф экспресс, 2018. – С. 149–152.
11. Петров Я.А. О технологии управления георисками в природно-технических системах для ГИС поддержки принятия решений // Естественные и технические науки. – 2018. – № 10 (124). – С. 125–129.
12. Физика океана / Под ред. Ю.П. Дорониной. СПб.: РГГМУ, 2000. – 340 с.
13. 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(1). – 012013.

References

1. Vagizov M.R., Istomin E.P., Kolbina O.N., Kochnev A.S., Miheev V.L., Yagotintseva N.V. Mechanism of neural network training for forecasting the meteorological situation when using GIS. *Geoinformatika*. 2021;1:22–29.
2. Vagizov M.R., Stepanov S.Yu., Petrov Ya.A., Sidorenko A.Yu. Method of decryption and inventory of forest plantations by means of GIS Autocad Map // *Geoinformatika*. 2020;4:20–27.
3. Gill A.E. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. New York: Academic Press; 1982. 662 p.
4. Doronin Yu.P. (ed.) *Dinamika okeana [Dynamics of the ocean]*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1980. 304 p.
5. Doronin Yu.P. *Okeanografiya shelf'ovoi zony [Oceanography of the shelf zone]*. St.-Petersburg: RSHU Publishers; 2007. 128 p.
6. Istomin E.P., Kirsanov S.A., Sokolov A.G., Kolbina O.N. The phenomenon of geo-information management and the principles of its implementation. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2014;4:180–188.
7. Istomin E.P., Petrov Ya.A., Istomin I.E. Modern approaches to GIS development. In: *INFOGEO-2018. Strategicheskoe upravlenie razvitiem territorij. Sbornik trudov V mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Geoinformatsionnoe obespechenie ustoychivogo razvitiya territorii"* (St.-Petersburg, 29–30 November 2018). St.-Petersburg; RSHU Publishers; 2018. P. 268–271.
8. Istomin E.P., Slesareva L.S. Application of stochastic models for forecasting of risks in geosystems. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2011;17:145–149.

9. *Martyn I.A.* Modeling of wave propagation the waters port. In: Marine Research and Education (MARESEDU-2018). Proceedings of the VII International Conference (Moscow, 19–22 November 2018). Tver': PoliPRESS; 2019. Vol. 3(4). pp. 159–166.
10. *Petrov Y.A.* Scientific and technical bases of georisk management in natural and technical systems. In: The current issues in forestry: Conference of Young Scientists (St.-Petersburg, 14–15 November 2018). St.-Petersburg: SPbSFTU; 2018. pp. 149–152.
11. *Petrov Y.A.* O tekhnologii upravleniya georiskami v prirodno-tekhnicheskikh sistemakh dlya GIS podderzhki prinyatiya reshenii [On the technology of georisk management in natural and technical systems for GIS support of decision-making]. *Natural and technical sciences*. 2018;10(124):125–129.
12. *Doronin Yu.P.* (ed.) Fizika okeana [Physics of the ocean]. St.-Petersburg: RSHU Publishers; 2000. 340 p.
13. *Istomin E., Martin I., Petrov Yu., Stepanov S., Sidorenko A.* Study of intraday current haze in the area of the navigable Baltic Strait to adjust the movement of water transport. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;817(1):012013.

Информация об авторах

Истомин Евгений Петрович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» 192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79
e-mail: biom@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6247-4373>

Михеев Валерий Леонидович

Кандидат юридических наук, доцент, ректор ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» 192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79
e-mail: rector@rshu.ru

Петров Ярослав Андреевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» 192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская ул., дом 79
e-mail: yaroslav.petrov025@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9185-441X>

Мартын Ирма Андреевна

Ассистент преподавателя кафедры прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» 192007, Россия, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79
e-mail: irma_martyn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4332-7308>

Information about authors

Eugene P. Istomin

Doctor of Technical Sciences, Head of the Applied Informatics Department of Russian State Hydrometeorological University 79, Voronezhskaya str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: biom@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6247-4373>

Valerii L. Mikheev

Candidate of Juridical Sciences, Associate Professor, Rector of Russian State Hydrometeorological University 79, Voronezhskaya str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: rector@rshu.ru

Yaroslav A. Petrov

Candidate of Technical Sciences, associate professor at the Applied Informatics department of Russian State Hydrometeorological University 79, Voronezhskaya str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: yaroslav.petrov025@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9185-441X>

Irma A. Martyn

Assistant Lecturer at the Applied Informatics Department of Russian State Hydrometeorological University 79, Voronezhskaya str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: irma_martyn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4332-7308>