

DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.4.38
УДК 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА ВОДОЕМА ПРИ НАЛИЧИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

А.И. Сухинов¹, В.В. Холодков², Е.А. Проценко³, С.В. Проценко³, Н.Д. Панасенко^{1,2}

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

²ООО Научно-производственная компания «Бюро Кадастра Таганрога», Таганрог, Российская Федерация

³Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета, Таганрог, Российская Федерация

Обсуждаются вопросы построения и адаптации к переменным природно-климатическим условиям и географическим особенностям прецизионных математических моделей гидродинамики волновых процессов и рельефообразования. Для новых по постановкам задач, рассматриваемых в статье, характерна проблема неполноты исходной информации, которая разрешается за счет привлечения данных дистанционного зондирования и кадастровой съемки. Вследствие этого комплекс созданных авторами алгоритмов включает растровые модели динамически изменяющегося рельефа дна с учетом результатов кадастровых съемок, дистанционного зондирования и результатов численного моделирования. При этом математическая модель транспорта донных материалов позволяет предсказывать динамику рельефа дна вследствие движения воды и многокомпонентных твердых частиц, учитывает пористость грунта, критическое значение касательного напряжения, при котором начинается перемещение наносов, турбулентный обмен, трансформацию геометрии дна, ветровые течения и трение о дно. С использованием программ, разработанных на основе комплекса алгоритмов, выполнены прогностические расчеты процессов эрозии берега и перестроения рельефа дна. Программы дают возможность задавать сложную геометрию дна в виде растровой модели, отвечающей сведениям кадастровых съемок и дистанционного зондирования, виду и характеристикам источника колебаний воды, направлению и скорости ветра. При анализе состояния водного объекта в целом принимаются во внимание характерные особенности природных процессов, одну из которых стоит отметить особо – это пространственно-временная изменчивость донного рельефа. Моделирование транспорта наносов показало, что с течением времени происходит их образование вблизи береговой зоны и, как следствие, уменьшение уклона ее дна и постепенное обмеление водоема.

Ключевые слова: математическое моделирование, мелководный водоем, дистанционное зондирование, кадастровая съемка, рельефообразование дна, растровая модель, прогностические расчеты

NUMERICAL MODELING OF CHANGES IN THE BOTTOM RELIEF OF THE RESERVOIR IN THE PRESENCE OF GRAVITATIONAL WAVES

A.I. Sukhinov¹, V.V. Kholodkov², E.A. Protsenko³, S.V. Protsenko³ and N.D. Panasenko^{1,2}

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

²LLC "Scientific and Production Company Bureau of Cadastre of Taganrog, Taganrog, Russian Federation

³Chekhov Taganrog Institute (branch) Rostov State University of Economics, Taganrog, Russian Federation

The issues concerning the construction of precision mathematical models of hydrodynamics of wave processes and relief formation and their adaptation to variable climatic conditions and geographical features are discussed. The incompleteness of initial information is characteristic of the new problems considered in the paper, and this difficulty is overcome by using the remote sensing and cadastral survey data. The complex of algorithms created by the authors includes raster models of a dynamically changing bottom relief that are based on the results of cadastral surveys, remote sensing data and numerical simulation results. The mathematical model of transport of bottom materials makes it possible to predict the bottom relief dynamics due to the movement of water and multicomponent solid particles and to take into account soil porosity, critical shear stress values at which sediment movement begins, turbulent exchange, bottom geometry transformation, wind currents, and bottom friction. The programs developed on the basis of a set of algorithms are used to perform predictive calculations of the processes of coastal erosion and reconstruction of the bottom relief. Using the programs, the complex geometry of the reservoir bottom is represented by a raster model that takes into account the data of cadastral surveys and remote sensing, the type and characteristics of the source of water fluctuations, and the direction and speed of wind. When analyzing the state of a water body as a whole, the characteristic features of natural processes, in particular, the spatial and temporal variability of the bottom relief, are considered. Modeling the transport of sediments has shown that, in the course of time, they are formed near the coastal zone, which leads to a decrease in the slope of its bottom and a gradual shallowing of the reservoir.

Key words: mathematical modeling, shallow water reservoir, remote sensing, cadastral survey, bottom relief formation, raster model, predictive calculations

1. Введение

В настоящее время наблюдается тенденция приложения современного математического аппарата и вычислительных технологий к решению практических проблем в различных областях взаимодействия человека и окружающей среды в условиях природных и техногенных проявлений. Одна из важнейших целей, стоящих перед исследователями — объединение всех интересующих факторов в единый процесс крупномасштабного физического моделирования [1–4]. Таким образом, построение в рамках волновой гидродинамики пространственно-трехмерной модели, предназначенной для изучения гидродинамических процессов при наличии разномасштабного турбулентного обмена, актуально и важно.

Прогноз состояния мелководных водоемов при чрезвычайных ситуациях, вызванных жизнедеятельностью человека или природными и климатическими катастрофами и явлениями, зачастую строится с привлечением математического моделирования. При этом требуется учитывать особенности водного объекта, такие как существующие гидродинамические режимы, климатические факторы, а также геометрию водоема и его прибрежной области. В современной действительности все чаще наблюдаются нежелательные, но порой неизбежные нарушения природной среды и баланса экосистемы водных объектов. Серьезные затруднения вызывает включение в модель изменения рельефа дна, разрушения берегов, влияния разного рода загрязнений. Несмотря на проведение широкого круга исследований, ориентированных на оценку возможных ситуаций, на разработку и проведение превентивных защитных мероприятий по рациональному использованию и сохранению водных ресурсов, в них недостаточно полно отражается совокупность разнообразных факторов и процессов: гидрофизических, гидродинамических, гидробиологических, метеорологических и антропогенных [5–8]. Это доказывает необходимость проведения системного решения задачи крупномасштабного физического моделирования и прогнозирования состояния прибрежных систем, построения взаимосвязанного комплекса моделей, высокопроизводительных алгоритмов и программ реализации вычислений на их основе.

Сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря приводят к трудностям в навигации, трансформации береговой линии, перераспределению донных осадков, затоплению прибрежных территорий. Как показал анализ данных дистанционного зондирования, оно представляет собой фундаментальный инструмент для наблюдения за происходящими явлениями и источник сведений для прогнозирования событий.

Так, в ноябре 2019 года над Азовским морем дул сильный восточный ветер (до 20 м/с), что в последней декаде месяца привело к ветровому сгону воды и частичной осушке Таганрогского залива. Наблюдения показали, что залив катастрофически обмелел, в связи с чем было полностью прекращено судоходство.

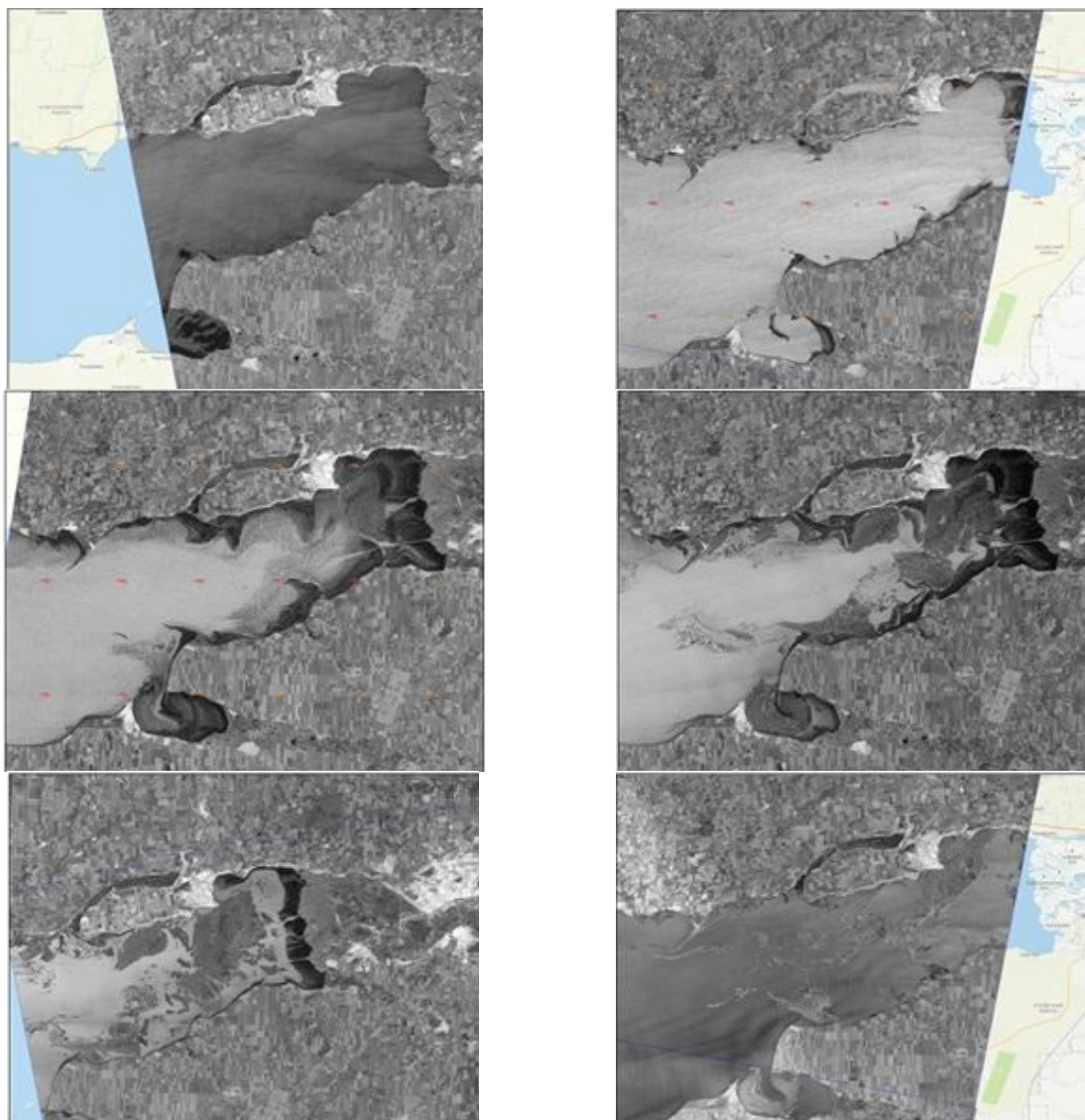


Рис. 1. Развитие явления сгона воды в Таганрогском заливе на серии последовательных радиолокационных изображений, полученных со спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B

Кроме того, с обнажившегося дна моря сильный ветер поднимал в воздух песок и переносил его на значительные расстояния. Подобная ситуация повторилась в декабре 2022 года. Динамику этого явления позволили увидеть данные дистанционного зондирования Земли в виде радиолокационных снимков, сделанных со спутников Европейского космического агентства (см. Рис. 1). На изображениях сгон воды виден благодаря тому, что зона осушки выглядит менее шероховатой и воспроизводится в тонах от темно-серых до черных. Наоборот, морская поверхность, которая под воздействием сильного ветра покрывалась интенсивным ветровым волнением, имеет более светлые тона. Анализ серии снимков показал, что вода из залива начала отступать 21 ноября, 22–23 ноября зарегистрирована максимальная осушка, а 24–25 ноября вода стала возвращаться в Таганрогский залив [9–14].

Поскольку в статье рассматриваются задачи, для решения которых исходная информация либо недостаточна, либо отсутствует, возникает необходимость в осуществлении калибровки и верификации математических моделей, построенных с привлечением данных дистанционного зондирования и кадастровой съемки.

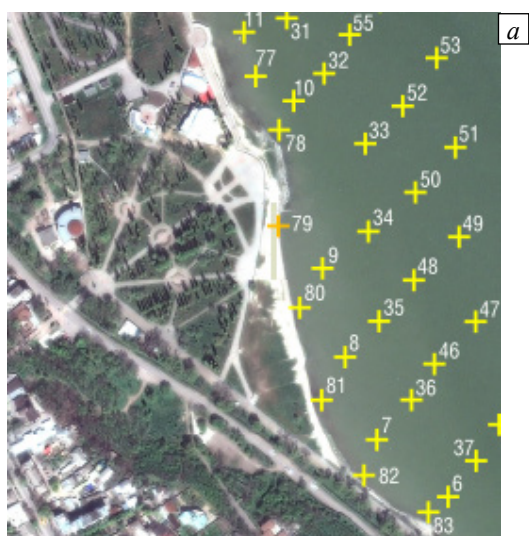
Цель работы заключается в описании подходов к построению прецизионных математических моделей гидродинамики волновых процессов и рельефообразования и адаптации моделей к ожидаемым сценариям изменения природно-климатических условий и географическим особенностям. Существенным является то, что предлагаемая для применения растровая модель дна, построенная на базе эмпирических данных кадастровой съемки и дистанционного зондирования, способна учитывать динамику изменения рельефа дна. Программный комплекс, созданный на базе моделей гидродинамики волновых процессов и рельефообразования, позволяет оперативно включать в расчеты постоянно обновляемые данные космического зондирования. Параллельное решение отдельных подзадач позволило сократить время построения прогноза процессов гидрофизики, в том числе опасных и катастрофических явлений. В статье приводятся прогностические оценки эрозии берега и изменения рельефа дна.

2. Входные данные для волновой модели гидродинамики

2.1. Построение растровой модели участка дна Азовского моря на основе данных геодезической съемки уровня дна

Для проведения расчетов требовался следующий набор исходных данных: пространственные координаты точек участка дна; результаты дистанционного зондирования границ области, затопленной водой; информация о силе и направлении ветра. Были использованы сведения, полученные геодезической съемкой уровня дна Таганрогского залива сотрудниками Бюро Кадастра г. Таганрога, дистанционным зондированием Азовского моря спутниками Worldview, Sentinel-1A и Sentinel-1B Европейского космического агентства, Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды European Reanalysis ERA (данные о силе ветра).

Основой представления пространственной информации в растровой модели являются так называемые дискретные операционно-территориальные единицы — пространственные объекты, для которых предполагается, что имеющаяся о них атрибутивная информация (множество характеристик, качественно и количественно описывающих объект) однородна с точки зрения изучаемого явления. Операционно-территориальные единицы соответствуют ячейкам регулярной сетки, которой покрывается выбранный для изучения пространственный объект.



Номер точки	X, м	Y, м	H, м	б
6	420260,63	1372926,89	-0,85	
7	420323,81	1372846,16	-0,82	
8	420416,07	1372809,20	-0,82	
9	420515,54	1372782,50	-0,79	
10	420703,03	1372747,80	-0,92	
11	420779,62	1372690,97	-0,82	
31	420795,80	1372738,79	-0,99	
32	420734,39	1372781,63	-1,04	
33	420656,13	1372828,77	-1,08	
34	420557,42	1372833,55	-1,00	
35	420456,90	1372846,85	-0,97	
36	420369,02	1372884,35	-0,94	
37	420301,38	1372957,80	-1,07	
46	420409,60	1372909,54	-1,06	
47	420457,74	1372955,30	-1,19	
48	420503,45	1372885,26	-1,07	
49	420552,69	1372935,44	-1,19	
50	420602,18	1372885,71	-1,12	

Рис. 2. Данные геодезической съемки уровня дна Таганрогского залива около Пушкинской набережной г. Таганрога: точки замеров (а); координаты съемочных точек (б)

Бюро Кадастра г. Таганрога выполнило геодезическую съемку уровня дна Таганрогского залива в районе Пушкинской набережной во время отлива. На рисунке 2а показан фрагмент области, где проводилась съемка. Крестиками отмечены точки, в которых измерена глубина, используемая для создания растровой модели. Уровень нуля высоты соответствует нулю в системе координат МСК-61 для зоны 1 [15]. Результаты замеров (Рис. 2б) записывались в текстовый файл в кодировке ASCII (1 — координата X , 2 — координата Y , H — глубина в точке с координатами (x, y)). Для моделирования и анализа поверхностей, визуализации ландшафта, генерирования сетки применялась геоинформационная система Golden Software Surfer [16]. Непревзойденным достоинством программы являются заложенные в нее алгоритмы интерполяции, которые позволяют с высочайшим качеством создавать цифровые модели поверхности по неравномерно распределенным в пространстве данным. Построенная растровая модель дна участка Азовского моря, которая использована как расчетная область, показана на рисунке 3.

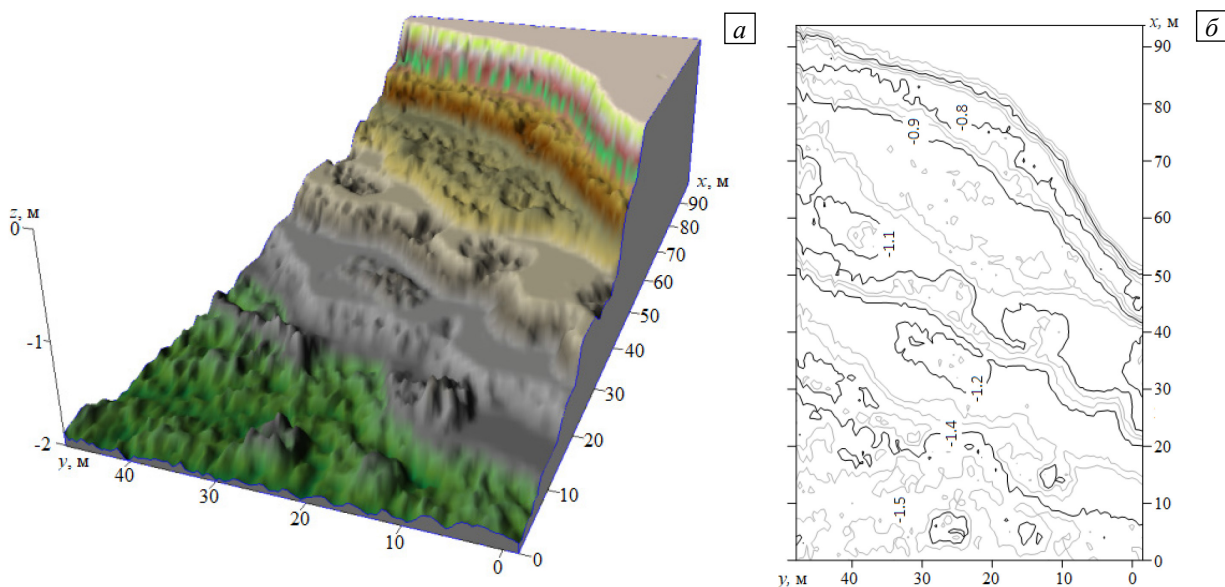


Рис. 3. Геометрия расчетной области (а) и изолинии глубины донной поверхности и береговая линия (б), воспроизведенные на основе данных геодезической съемки

2.2. Идентификация контуров методом локальных бинарных шаблонов

Распознавание объектов, их контуров играет важную роль в анализе изображений при реализации компьютерного зрения. В настоящее время существует большое число различных алгоритмов, но лишь некоторые из них имеют широкое распространение за счет своей универсальности. Для обработки изображений в данной работе применяется метод локальных бинарных шаблонов — Local Binary Patterns (LBP).

Под контуром изображения, согласно методу, понимается пространственно-протяженный разрыв, перепад или скачкообразное изменение значений яркости. Для определения контуров разработан алгоритм на основе данных дистанционного зондирования, включающий шаги: прием и фильтрация данных (спутниковых изображений многоспектральной съемки, улучшение их качества при наличии помех); определение и классификация контуров с помощью метода LBP; при необходимости (в случае невозможности замкнутых контуров) дополнительная обработка с возвратом к предыдущим шагам; подготовка полученной информации к оценке динамики границ по серии космических снимков в разные моменты времени (календарные даты).

Суть метода LBP заключается в следующем [6]. LBP-признак представляется в виде целого значения (от 0 до 255) и ставится в соответствие прямоугольной области изображения. Ширина и высота будут кратны трем. В процессе перебора считывается разность яркости текущего и окружающих пикселей. Формула для определения признака имеет вид:

$$LBP(X, Y, W, H) = 2^7 \cdot [s_{00} \geq s_{11}] + 2^6 \cdot [s_{10} \geq s_{11}] + 2^5 \cdot [s_{01} \geq s_{11}] + 2^0 \cdot [s_{01} \geq s_{11}] + 2^4 \cdot [s_{21} \geq s_{11}] + 2^1 \cdot [s_{02} \geq s_{11}] + 2^2 \cdot [s_{12} \geq s_{11}] + 2^3 \cdot [s_{22} \geq s_{11}],$$

где (X, Y) — координаты левого верхнего пикселя рассматриваемой области, $(W, H) = (3w, 3h)$ — размеры области для вычисления, $s_{i,j}$ — сумма пикселей по прямоугольнику, $p(x, y)$ — значение пикселя изображения.

Пример реализации изображен на рисунке 4. При этом рассматриваемый прямоугольник разбивается на подпрямоугольники 3×3 пикселя, а отношение яркости («выше» или «ниже») 8-ми нецентральных подпрямоугольников к центральному кодируется как 8-битное двоичное число. При этом $s_{i,j}$ вычисляется по формуле:

$$s_{ij} = \sum_{(x=0)}^{def(w-1)} \sum_{(y=0)}^{(h-1)} p(X + iw + x, Y + jh + y).$$

После определения контуров возникает задача соответствия выявленных объектов цветовой шкале. Подключается метод нейронной сети. Выходной слой представляет карту признаков. При помощи сегментации происходит объединение типично различных экземпляров объекта. Для этого вводится новая метрика Panoptic Quality (PQ). Формула вычисления PQ с учетом совпадений сопоставленных сегментов имеет вид:

$$PQ = \frac{\sum_{(p,g) \in MP} SP(p,g)}{|MP| + |UP|/2 + |UT|/2},$$

где p — прогнозируемые сегменты, g — окружение объекта, SP — пороговое значение, равное 0,5, MP — согласованные пары, UP — несогласованные прогнозируемые сегменты, UT — несогласованные наземные сегменты истинности. Таким образом с помощью метода LBP-neural network определяются границы области моделирования — участки, подверженные затоплению. Пример реализации изображен на рисунке 4. При этом рисунок 4а есть исходное изображение со спутника, рисунок 4б демонстрирует выделение области изменений среды.

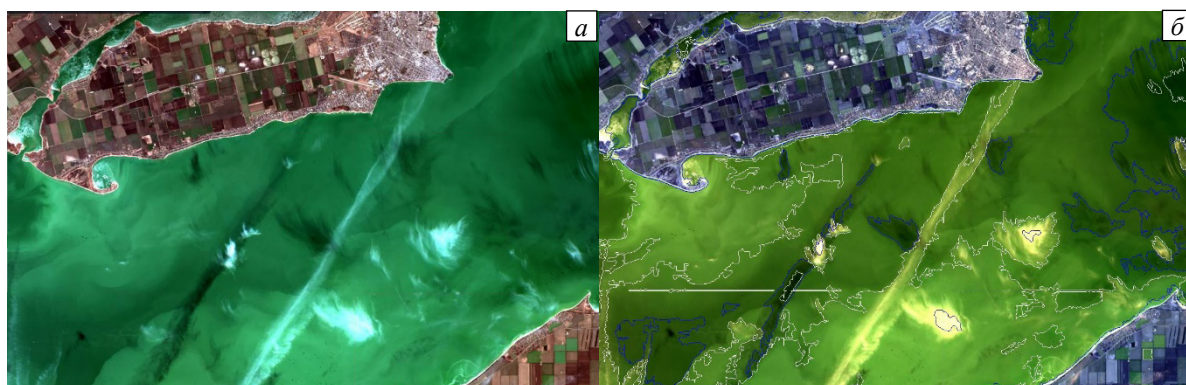


Рис. 4. Выделения контуров объектов: изображение со спутника LandViewer (геосервис NASA) выбранной области исследования (а) и результат применения метода LBP-neural network

3. Пространственно-неоднородная трехмерная математическая модель волновой гидродинамики мелководного водоема

Пространственно-неоднородная трехмерная математическая модель волновой гидродинамики мелководного водоема включает:

– уравнения движения (уравнения Навье–Стокса)

$$\begin{aligned} u'_t + uu'_x + vv'_y + ww'_z &= -p'_x/\rho + (\mu u'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (\nu u'_z)'_z, \\ v'_t + uv'_x + vv'_y + ww'_z &= -p'_y/\rho + (\mu v'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (\nu v'_z)'_z, \\ w'_t + uw'_x + vw'_y + ww'_z &= -p'_z/\rho + (\mu w'_x)'_x + (\mu w'_y)'_y + (\nu w'_z)'_z + g; \end{aligned}$$

– уравнение неразрывности:

$$\rho'_t + (\rho u)'_x + (\rho v)'_y + (\rho w)'_z = 0,$$

где $\mathbf{V} = \{u, v, w\}$ — вектор скорости водного потока мелководного водоема, ρ — плотность водной среды, p — гидродинамическое давление, g — ускорение свободного падения, μ, ν — коэффициенты турбулентного обмена в горизонтальном и вертикальном направлениях [1].

3.1. Дискретная математическая модель задачи гидродинамики

Расчетная область вписана в параллелепипед. Для численной реализации поставленной задачи гидродинамики требуется сведение ее математической формулировки к дискретному виду. Для этого вводится равномерная сетка:

$$\bar{w}_h = \{t^n = n\tau, x_i = ih_x, y_j = jh_y, z_k = kh_z; n = \overline{0, N_t}, i = \overline{0, N_x}, j = \overline{0, N_y}, k = \overline{0, N_z}; N_t\tau = T, N_x h_x = l_x, N_y h_y = l_y, N_z h_z = l_z\},$$

где τ — шаг по времени, h_x, h_y, h_z — шаги по пространству, N_t — количество временных слоев, T — верхняя граница временной координаты, N_x, N_y, N_z — количество узлов по пространственным координатам, l_x, l_y, l_z — длины ребер параллелепипеда в направлении осей Ox, Oy и Oz соответственно.

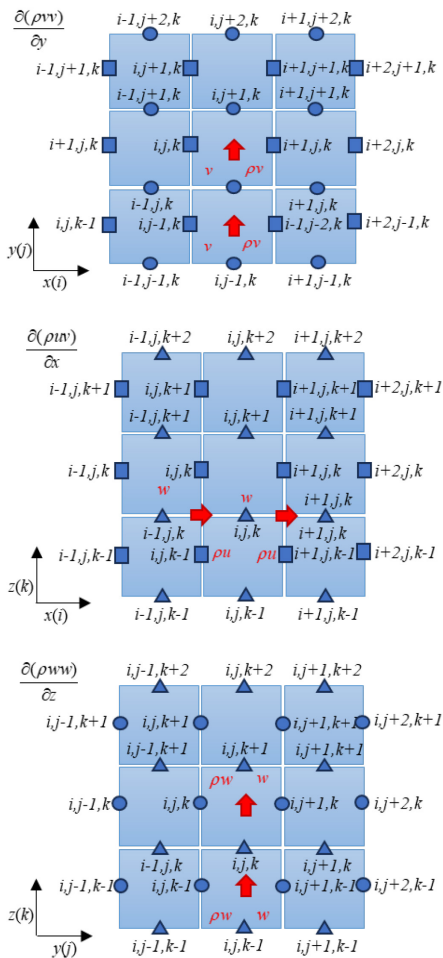


Рис. 5. Распределение компонент скорости u, v, w на разнесенной сетке

второй порядок точности по пространству. Сравнение алгоритмов на разнесенных и совмещенных сетках, показало, что на разнесенных сетках лучше выполняются законы сохранения. Другим преимуществом схем на разнесенных сетках является связь между скоростью и давлением, не дающая нефизических (сеточных) осцилляций, характерных для схем на совмещенных сетках.

При прямом численном моделировании — Direct Numerical Simulation (DNS), предполагается, что сетка достаточно мелкая, чтобы разрешить турбулентность в масштабе Колмогорова. Таким образом, в режиме DNS записанные выше уравнения решаются непосредственно, без необходимости использования дополнительных моделей. Коэффициенты переноса соответствуют коэффициентам молекулярного переноса с допущением $\nu = \mu/\rho$ умножается на ρ при построении диффузионных членов.

При моделировании турбулентных течений с использованием подхода больших вихрей — Large Eddy Simulation (LES), предполагается, что масштабы Колмогорова не разрешены. В результате численная дискретизация действует как фильтр. Модели LES основаны на гипотезе градиентного переноса, согласно которой турбулентный перенос действует аналогично молекулярному в том смысле, что вещество движется

При решении задачи гидродинамики используется метод коррекции давления. Согласно методу, при переменной плотности разрешающие уравнения преобразуются к виду [11]:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{u}-u}{\tau} + u\tilde{u}'_x + v\tilde{u}'_y + w\tilde{u}'_z &= (\mu\tilde{u}'_x)'_x + (\mu\tilde{u}'_y)'_y + (\nu\tilde{u}'_z)'_z, \\ \frac{\tilde{v}-v}{\tau} + u\tilde{v}'_x + v\tilde{v}'_y + w\tilde{v}'_z &= (\mu\tilde{v}'_x)'_x + (\mu\tilde{v}'_y)'_y + (\nu\tilde{v}'_z)'_z, \\ \frac{\tilde{w}-w}{\tau} + u\tilde{w}'_x + v\tilde{w}'_y + w\tilde{w}'_z &= (\mu\tilde{w}'_x)'_x + (\mu\tilde{w}'_y)'_y + (\nu\tilde{w}'_z)'_z + g, \\ p''_{xx} + p''_{yy} + p''_{zz} &= \frac{\hat{\rho}-\rho}{\tau^2} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{u})'_x}{\tau} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{v})'_y}{\tau} + \frac{(\hat{\rho}\tilde{w})'_z}{\tau}, \\ \frac{\hat{u}-\tilde{u}}{\tau} &= -\hat{p}'_x/\rho, \quad \frac{\hat{v}-\tilde{v}}{\tau} = -\hat{p}'_y/\rho, \quad \frac{\hat{w}-\tilde{w}}{\tau} = -\hat{p}'_z/\rho, \end{aligned}$$

где $\{u, v, w\}, \{\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}\}, \{\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}\}$ — компоненты вектора скорости на предыдущем, «новом» и промежуточном временных слоях соответственно, $\tilde{u} = (\tilde{u} + u)/2$, $\hat{\rho}$ и ρ — распределение плотности водной среды на «новом» и предыдущем временных слоях.

Для решения численными методами уравнений Навье–Стокса, записанных в переменных скорость–давление, строятся разнесенные сетки. На рисунке 5 представлена сетка Arakawa C с указанием распределения прогностических и диагностических переменных и их индексация в срезах, параллельных плоскостям Ox, Oy и Oz . Каждая компонента скорости и давления задается на собственной сетке, конвективные члены аппроксимируются центральными разностями, и схема имеет

вниз по разрешенным градиентам. Отфильтрованные уравнения при подходе LES принимают точно такую же форму, что и при молекулярном переносе, но вместо постоянных коэффициентов берутся турбулентные эквиваленты (например, вместо μ турбулентная вязкость μ_t). Следовательно, когда код выполняется LES, набор уравнений остается прежним, но в отфильтрованной версии используются коэффициенты турбулентного переноса.

Рассмотрим модель Смагоринского для реализации подхода LES. В модели Смагоринского предположим, что скорость диссипации может быть выражена через среднюю скорость деформации ячеечного масштаба: $\bar{s} = 2\bar{s}_{ij} \cdot \bar{s}_{ij}$, (\bar{s}_{ij} — осредненный тензор скоростей деформации). Соотношение $\nu = C_s^2 \Delta^2 \bar{s}^{-1/2}$ содержит C_s — безразмерную эмпирическую константу Смагоринского, выбранное значение которой должно обеспечивать соответствие с экспериментальными измерениями:

$$\mu_t = (C_s \Delta)^2 (\sqrt{2\bar{s}}) \bar{\rho}, \quad \tau_{ij} = 2\mu_t \bar{s}_{ij},$$

где Δ представляет собой кубический корень из объема ячейки — репрезентативного расстояния между соседними ячейками. В модели Смагоринского μ_t не учитывает турбулентную кинетическую энергию (ТКЭ), соответствующую неразрешенным масштабам, и никакое дополнительное уравнение для ТКЭ не решается.

При дискретизации векторы скорости водного потока строились с учетом влияния картографических коэффициентов, которые определяются как отношение расстояния в расчетном пространстве к соответствующему расстоянию на поверхности земли. Когда применяется подход LES, объем ячейки участвует в вычислении вихревой вязкости и также должен быть скорректирован исходя из картографических коэффициентов.

4. Описание программного комплекса

В работе был использован усовершенствованный программный комплекс «3D Coastal Hydro-Physics Modeling» [11], который учитывает динамические изменения расчетной области за счет волновых процессов, струйные эффекты и многокомпонентную природу примесей. Комплекс предназначен для построения трехмерных полей скоростей движения водной среды с учетом неоднородного по глубине коэффициента вертикального турбулентного обмена и динамического перестроения геометрии расчетной области. Программный комплекс реализован на языке C++. Положенный в его основу алгоритм вычислительного эксперимента схематически представлен на рисунке 6.

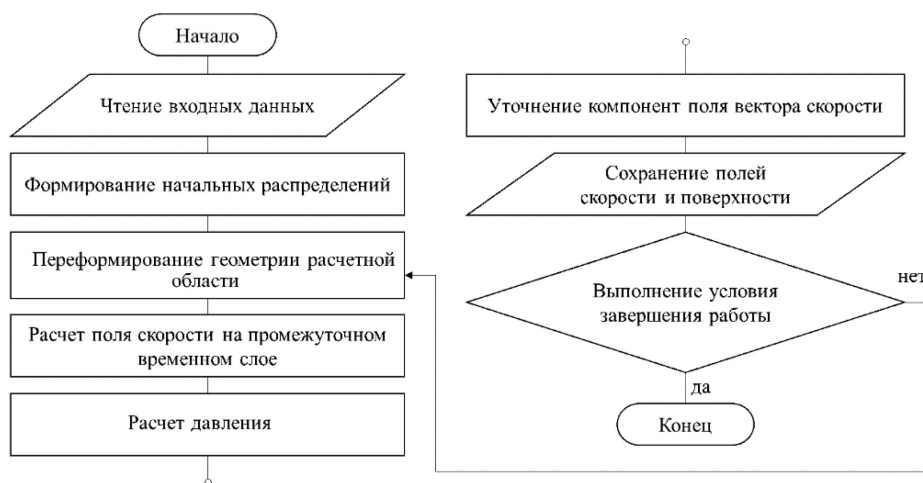


Рис. 6. Схема алгоритма вычислительного эксперимента

Математическая модель транспорта донных материалов, включенная в программный комплекс, позволяет предсказывать динамику изменения рельефа дна за счет движения воды и многокомпонентных твердых частиц, учитывает пористость грунта, критическое значение касательного напряжения, при котором начинается перемещение наносов, турбулентный обмен, динамически меняющуюся геометрию дна, ветровые течения и трение о дно [9, 11].

Осуществлена параллельная реализация алгоритма, основанного на декомпозиции вычислительной области в двух пространственных направлениях. Использование стандартной технологии обмена данными — Message Passing Interface (MPI), позволило провести расчетные эксперименты на многопроцессорной вычислительной системе. Максимальное ускорение работы алгоритма (отношение времени в секундах, необходимого для последовательного вычисления, ко времени в секундах, затрачиваемому на моделирование с использованием нескольких процессоров), равнялось 43,668 и достигалось на 128 процессорах [11].

5. Численный эксперимент

С помощью разработанного комплекса программ в качестве примера решена задача определения параметров гидродинамического воздействия волн на участок дна Таганрогского залива в районе Пушкинской набережной, площадь моделирования имела размеры 100×50 м и глубину 1,8 м. Начальными условиями служили восстановленные данные для рельефа дна исследуемого участка. При расчетах использована сетка $100 \times 200 \times 40$ узлов и шагом по времени 0,01 с. Предполагалось, что в начальный момент времени жидкость находилась в состоянии покоя. Источником возмущения (возникновения волнового движения) был ветровой поток, имеющий направление с северо-востока на юго-запад (в рамках модели — из открытого моря к берегу) и скорость 15 м/с.

Результаты численных экспериментов по моделированию распространения волновых гидродинамических процессов на основе 3D модели движения водной среды, учитывающей неоднородность турбулентного перемешивания по вертикальному направлению, в разные моменты времени, представлены на рисунке 7. По данным вычислений построен прогноз изменения гидродинамических волновых процессов прибрежной зоны, предсказано формирование вихревых структур. Видно, что турбулентные вихревые структуры распространяются вниз к морскому дну после гребня волны, этот процесс вызывает образование наклонно нисходящих вихрей, которые тянутся за гребнем волны. При этом турбулентность создается на фронте волны и медленно распространяется вниз ко дну через нисходящие вихри. Когерентные турбулентные структуры обрушиваются на дно на некотором расстоянии позади гребня волны. Крупномасштабные когерентные вихри вызывают сильное вертикальное перемешивание, а турбулентность, являющаяся следствием разрушения водной поверхности, распространяется вниз за счет конвекции.

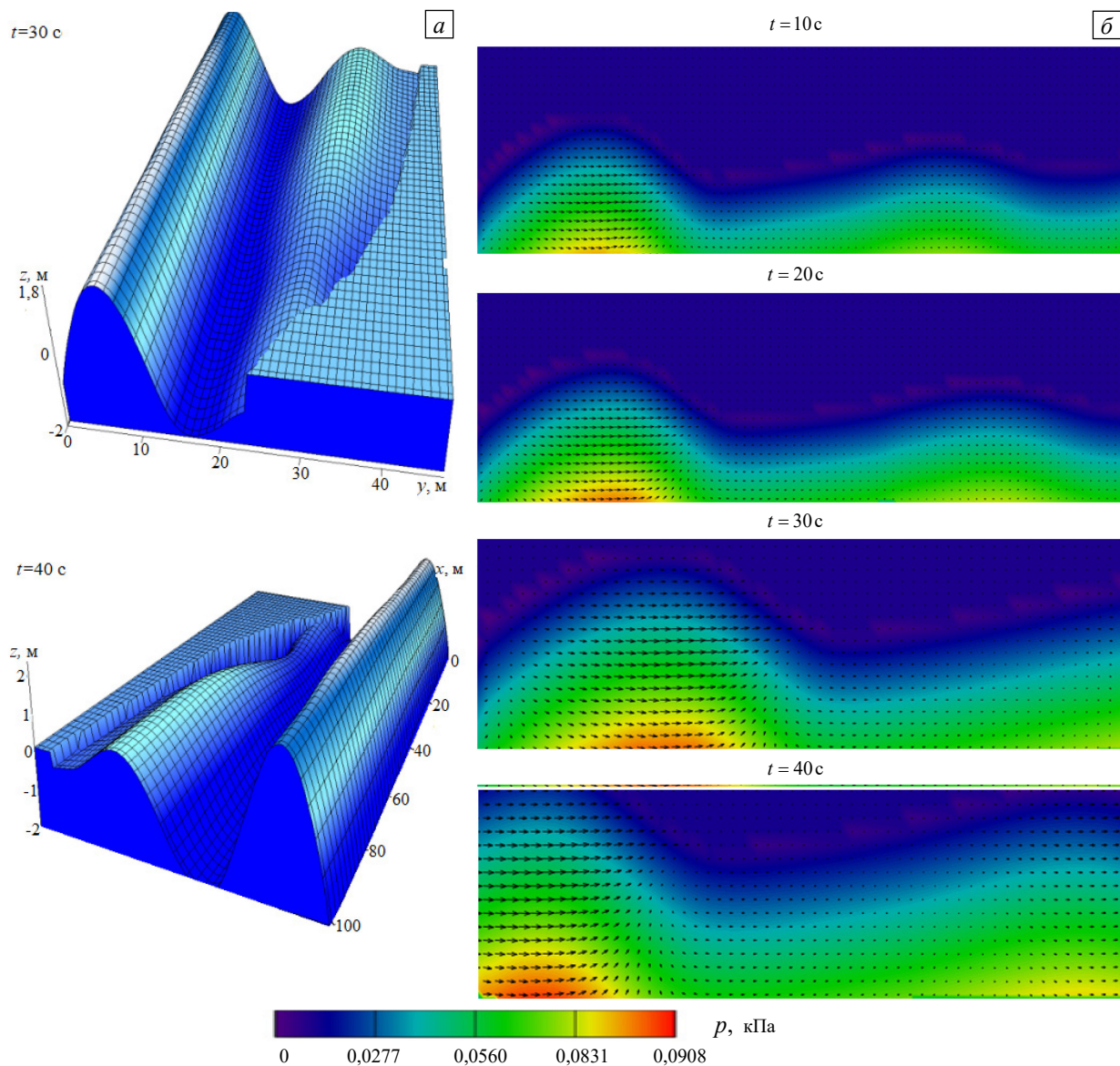


Рис. 7. Профили волн (а) и поля скорости (стрелки) и давления (цвет) (б) в разные моменты времени

Однако относительно небольшая часть энергии волны рассеивается в области ниже уровня впадины, а большая часть — между гребнем волны и ее впадиной. Сила и интенсивность вихревого движения изменяется синхронно с волновыми колебаниями, наблюдается явно выраженная асимметрия генерации турбулентности по всей толще воды. Данные процессы влияют на динамику образования структур и наносов, переноса взвесей в водном объекте, а также на уровень загрязнения его вод.

На рисунке 8 представлена растровая модель донного рельефа, динамически изменяющегося вследствие волнового воздействия при наличии разномасштабного турбулентного обмена, построенная по данным геодезической съемки, а также приведен вид дна на этапе численного моделирования процесса транспорта наносов. Видно, что с течением времени происходит образование наносов, уменьшение уровня глубины и угла уклона дна береговой зоны и, как следствие, постепенное обмеление рассматриваемой зоны водоема. Анализ батиметрии дна на сороковой минуте расчетного времени показывает, что изолинии функции глубины в центре расчетной области начинают приобретать волнообразную форму. Участки, которые ранее были сглаженными, вследствие попадания на них донного материала, становятся более неоднородными и шероховатыми, во многих местах появляются остроконечные вершины, по всей поверхности дна водоема происходит отложение наносов. Вследствие указанных процессов уровень глубины в береговой зоне уменьшается. Так, на срезе $x = 25$ м средняя глубина стала меньше на 11,7 см, на срезе $x = 50$ м — на 14,6 см.

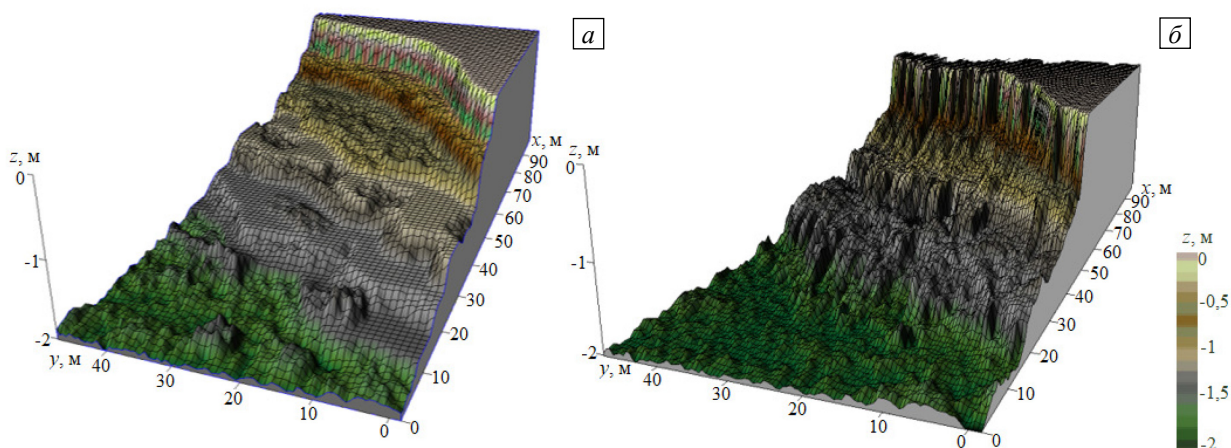


Рис. 8. Моделирование динамически изменяющегося рельефа дна водоема: исходная геометрия расчетной области, восстановленная на основе данных геодезической съемки (а), результаты вычислений на сороковой минуте расчетного времени (б)

6. Заключение

Обсуждается задача построения и исследования пространственно-трехмерной модели волновой гидродинамики, предназначенной для моделирования гидродинамических процессов при наличии разномасштабного турбулентного обмена, основанной на согласовании аналитических, численных, экспериментальных подходов и натурных данных. В статье представлены подходы к построению прецизионных математических моделей гидродинамики волновых процессов и рельефообразования, и адаптация моделей к ожидаемым сценариям изменения природно-климатических условий и географическим особенностям. Построена растровая модель участка дна Азовского моря, которая базируется на эмпирических данных кадастровой съемки и дистанционного зондирования и способна учитывать динамику изменения рельефа дна. Описанный программный комплекс, позволяет проводить прогностические расчеты процессов эрозии берега и изменения рельефа дна. Моделирование состояния водного объекта учитывает характерные особенности природных процессов, среди которых стоит отметить пространственно-временную зависимость рельефообразования и осадконакопления и, как следствие, трансформирование береговой линии. Параллельное решение отдельных подзадач позволило сократить время построения прогноза процессов гидрофизики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00295, <https://rscf.ru/project/22-11-00295/>.

Литература

1. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А., Сидорякина В.В., Проценко С.В. Комплекс объединенных моделей транспорта наносов и взвесей с учетом трехмерных гидродинамических процессов в прибрежной зоне // Матем. моделирование. 2020. Т. 32, № 2. С. 3-23. <https://doi.org/10.20948/mm-2020-02-01>
2. Alekseenko E., Roux B., Sukhinov A., Kotarba R., Fougere D. Nonlinear hydrodynamics in a Mediterranean lagoon // Nonlin. Processes Geophys. 2013. Vol. 20. P. 189-198. <https://doi.org/10.5194/npg-20-189-2013>
3. Chamecki M., Chor T., Yang D., Meneveau C. Material transport in the ocean mixed layer: Recent developments enabled by large eddy simulations // Rev. Geophys. 2019. Vol. 57. P. 1338-1371. <https://doi.org/10.1029/2019RG000655>

4. DiBenedetto M.H., Ouellette N.T., Koseff J.R. Transport of anisotropic particles under waves // *J. Fluid Mech.* 2018. Vol. 837. P. 320-340. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.853>
5. Onink V., Wichmann D., Delandmeter P., Van Sebille E. The role of Ekman currents, geostrophy and Stokes drift in the accumulation of floating microplastic // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2019. Vol. 124. P. 1474-1490. <https://doi.org/10.1029/2018JC014547>
6. Panasenko N.D., Poluyan A.Yu., Motuz N.S. Algorithm for monitoring the plankton population dynamics based on satellite sensing data // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2131. 032052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032052>
7. Poulain M., Mercier M.J., Brach L., Martignac M., Routaboul C., Perez E., Desjean M.C., ter Halle A. Small microplastics as a main contributor to plastic mass balance in the North Atlantic subtropical gyre // *Environ. Sci. Technol.* 2019. Vol. 53. P. 1157-1164. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05458>
8. Prata J.C., da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review // *Trends Anal. Chem.* 2019. Vol. 110. P. 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>
9. Protsenko S., Sukhinova T. Mathematical modeling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures // *MATEC Web Conf.* 2017. Vol. 132. 04002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204002>
10. Smit P.B., Janssen T.T., Herbers T.H.C. Nonlinear wave kinematics near the ocean surface // *J. Phys. Oceanogr.* 2017. Vol. 47. P. 1657-1673. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0281.1>
11. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежной зоне мелководных водоемов // *Матем. моделирование.* 2013. Т. 25, № 12. С. 65-82. (English version <https://doi.org/10.1134/S2070048214040097>)
12. The official website of NASA Worldview <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
13. The official website of Roscosmos Geoportal <https://www.gptl.ru/>
14. The official website of Earth observing system <https://eos.com/landviewer/>
15. The official website of MapInfo <https://mapbasic.ru/msk61>
16. The official website of Golden Software Support <https://support.goldensoftware.com>

References

1. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A., Sidoryakina V.V., Protsenko S.V. Set of coupled suspended matter transport models including three-dimensional hydrodynamic processes in the coastal zone. *Math. Models Comput. Simul.*, 2020, vol. 12, pp. 757-769. <https://doi.org/10.1134/S207004822005018X>
2. Alekseenko E., Roux B., Sukhinov A., Kotarba R., Fougere D. Nonlinear hydrodynamics in a Mediterranean lagoon. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2013, vol. 20, pp. 189-198. <https://doi.org/10.5194/npg-20-189-2013>
3. Chamecki M., Chor T., Yang D., Meneveau C. Material transport in the ocean mixed layer: Recent developments enabled by large eddy simulations. *Rev. Geophys.*, 2019, vol. 57, pp. 1338-1371. <https://doi.org/10.1029/2019RG000655>
4. DiBenedetto M.H., Ouellette N.T., Koseff J.R. Transport of anisotropic particles under waves. *J. Fluid Mech.*, 2018, vol. 837, pp. 320-340. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.853>
5. Onink V., Wichmann D., Delandmeter P., Van Sebille E. The role of Ekman currents, geostrophy and Stokes drift in the accumulation of floating microplastic. *J. Geophys. Res. Oceans*, 2019, vol. 124, pp. 1474-1490. <https://doi.org/10.1029/2018JC014547>
6. Panasenko N.D., Poluyan A.Yu., Motuz N.S. Algorithm for monitoring the plankton population dynamics based on satellite sensing data. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2131, 032052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032052>
7. Poulain M., Mercier M.J., Brach L., Martignac M., Routaboul C., Perez E., Desjean M.C., ter Halle A. Small microplastics as a main contributor to plastic mass balance in the North Atlantic subtropical gyre. *Environ. Sci. Technol.*, 2019, vol. 53, pp. 1157-1164. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05458>
8. Prata J.C., da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *Trends Anal. Chem.*, 2019, vol. 110, pp. 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>
9. Protsenko S., Sukhinova T. Mathematical modeling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures. *MATEC Web Conf.*, 2017, vol. 132, 04002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713204002>
10. Smit P.B., Janssen T.T., Herbers T.H.C. Nonlinear wave kinematics near the ocean surface. *J. Phys. Oceanogr.*, 2017, vol. 47, pp. 1657-1673. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0281.1>
11. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Mathematical modeling of sediment transport in the coastal zone of shallow reservoirs. *Math. Models Comput. Simul.*, 2014, vol. 6, pp. 351-363. <https://doi.org/10.1134/S2070048214040097>
12. The official website of NASA Worldview <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
13. The official website of Roscosmos Geoportal <https://www.gptl.ru/>
14. The official website of Earth observing system <https://eos.com/landviewer/>
15. The official website of MapInfo <https://mapbasic.ru/msk61>
16. The official website of Golden Software Support <https://support.goldensoftware.com>

Поступила в редакцию 21.02.2023; после доработки 22.05.2023; принята к опубликованию 24.09.2023

Сведения об авторах

Сухинов Александр Иванович, член-корр. РАН, дфмн, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ), 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; e-mail: sukhinov@gmail.com

Холодков Валентин Владимирович, дир., ООО «Научно-производственная компания «Бюро Кадастра Таганрога», 347922, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Петровская, д. 44; e-mail: info@cbt.ru

Проценко Елена Анатольевна, кфмн, доц., Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) РГЭУ (РИНХ), 347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, д. 48; e-mail: earpos@rambler.ru

Проценко Софья Владимировна, кфмн, доц., РГЭУ (РИНХ); e-mail: rab55555@rambler.ru

Панасенко Наталья Дмитриевна, б/с, нс, РГЭУ (РИНХ); e-mail: natalija93_93@mail.ru