

Программный инструмент оперативной подготовки данных для оценки структуры вдольбереговых потоков наносов в прибрежной зоне моря

В. В. Долотов *, В. Ф. Удовик

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: dolotov_v_v@mhi-ras.ru*

Аннотация

Описываются результаты разработки геоинформационного программного инструмента, предназначенного для автоматизированного формирования массива входных параметров, необходимых для оценки направления и относительной интенсивности вдольбереговых потоков наносов с использованием ветроэнергетического метода. Указанный метод устанавливает непосредственную связь между энергией ветрового воздействия на водную поверхность и интенсивностью перемещения наносов. Его применение корректно в случае выполнения расчетов для отмелых и относительно прямолинейных участков береговой зоны с песчано-гравийными наносами, при этом в качестве входных параметров используется информация о направлении и скорости ветра, а также длина разгона волнения по секторам различного направления и средняя глубина по лучам разгона. Указанные параметры являются индивидуальными для каждого отрезка аппроксимации исследуемого участка побережья. Возможность использования данных о ветре как о единственном параметре, характеризующем вынуждающую силу, предоставляет преимущество при использовании метода для проведения предварительных и рекогносцировочных оценок структуры и основных параметров движения наносов в малоизученных и не обеспеченных данными о волнении районах. Основы метода разрабатывались в условиях отсутствия вычислительной техники, поэтому значительная трудоемкость подготовки региональных данных накладывала ограничения на возможности детализации береговой линии при ее аппроксимации кусочно-линейной функцией. То же ограничение накладывалось и на количество секторов по направлению ветра при подсчете энергии, интерпретируемой в качестве наносодвижущей силы. Развитие и доступность современных геоинформационных технологий в части создания новых либо использования уже существующих цифровых моделей рельефа дна послужили предпосылкой к разработке авторами модифицированного варианта расчетной схемы ветроэнергетического метода и специализированного программного инструмента для автоматизации этапа подготовки набора региональных входных параметров. Практическое его применение позволило значительно ускорить процесс подготовки цифровых массивов данных для уточнения структуры потоков наносов для протяженных участков береговой зоны Западного Крыма.

© Долотов В. В., Удовик В. Ф., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: вдольбереговые потоки наносов, ветроэнергетический метод, ветро-волновой режим, ГИС, литодинамические процессы, береговая зона моря, прибрежная зона, автоматизация расчетов

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0827-2020-0004 «Прибрежные исследования».

Для цитирования: Долотов В. В., Удовик В. Ф. Программный инструмент оперативной подготовки данных для оценки структуры вдольбереговых потоков наносов в прибрежной зоне моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 46–55. EDN PTTPUK.

A Software Tool for Operative Data Preparation for Assessing the Structure of Longshore Sediment Flows in the Coastal Zone of the Sea

V. V. Dolotov*, V. F. Udovik

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: dolotov_v_v@mhi-ras.ru*

Abstract

The paper describes geoinformation software developed for automated formation of an array of input parameters necessary to assess the direction and relative intensity of alongshore sediment flows using the wind energy method. This method establishes a direct relationship between the energy of wind action on the water surface and the intensity of sediment movement. The method can be applied to calculations for shallow and relatively straight coastal sections with sand and gravel deposits. As input parameters, the software uses information about both the wind direction and speed, as well as the length of the wave acceleration along the sectors of different directions and the average depth along the acceleration rays. These parameters are individual for each segment of the approximation of the study coast section. The possibility of using wind data as the only parameter characterizing the driving force provides an advantage when using the method to conduct preliminary and reconnaissance assessments of the structure and main parameters of sediment movement in the areas that are poorly studied or not covered with disturbance data. The basics of the method were developed in the absence of computer technology. Therefore, the considerable complexity of preparing regional data limited the possibility to detail the coastline when approximating it by a piecewise linear function. The same limitation was imposed on the number of sectors in the wind direction when calculating the energy interpreted as a sediment movement force. The development and availability of modern geoinformation technologies in terms of creating new digital models of the bottom relief or using existing ones predetermined that the authors develop a modified version of the calculation scheme of the wind energy method and a specialized software tool to automate the preparation stage of a set of regional input parameters. The software allows the user to significantly accelerate preparation of digital data arrays to clarify the structure of sediment flows for extended sections of the coastal zone of Western Crimea.

Keywords: longshore sediment flows, wind energy method, wind-wave regime, GIS, lithodynamics processes, coastal zone, automation of calculations

Acknowledgments: The work was performed under state assignment of MHI RAS on topics no. 0827-2020-0004 “Coastal research”.

For citation: Dolotov, V.V. and Udovik, V.F., 2023. A Software Tool for Operative Data Preparation for Assessing the Structure of Longshore Sediment Flows in the Coastal Zone of the Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 46–55.

Введение

Изучение литодинамических процессов в береговой зоне моря является одним из важнейших и актуальных направлений развития научных исследований прибрежной зоны морей, что отражено во множестве как классических^{1), 2)} [1, 2], так и современных³⁾ [3–5] публикаций. Это обусловлено насущной потребностью использования результатов подобных исследований при изучении состояния морских берегов и прогноза тенденций их развития. Такие тенденции способны проявляться как в естественных условиях, так и при различных сценариях антропогенного воздействия. Эти результаты особенно необходимы при реализации проектов масштабного техногенного преобразования береговой зоны, направленных на сохранение используемых прибрежных территорий и расположенных на них объектов инфраструктуры. Другим примером применения могут служить проекты освоения новых перспективных регионов, к которым в Российской Федерации в первую очередь относятся труднодоступные районы на побережье Арктики и Дальнего Востока.

Основным направлением инженерных изысканий в таких случаях является выявление и уточнение качественных и количественных характеристик перестроения рельефа берегов в районе работ на различных пространственных и временных масштабах под воздействием природных и антропогенных факторов. При этом на начальных этапах планирования и технико-экономического обоснования проектов часто необходимо в сжатые сроки получить информацию об основных причинно-следственных связях между ветро-волновым режимом и вдольбереговым перемещением наносов в границах отдельного участка побережья.

При отсутствии необходимого объема данных натуральных наблюдений для решения подобных задач в настоящее время возможно использование методик, основанных на упрощенных эмпирических и полуэмпирических соотношениях и позволяющих оперативно получить требуемую предварительную информацию с минимальным набором входных параметров^{3), 4)}. Большинство подобных методик создавалось еще в условиях отсутствия вычислительной техники. Однако они не теряют своей актуальности и в настоящее время. Так, например, проводятся исследования, направленные преимущественно на калибровку коэффициентов с сохранением основных расчетных формул [6].

¹⁾ Зенкович В. П. Основы учения о развитии морских берегов. Москва : Наука, 1962. 710 с.

²⁾ Лонгинов В. В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1963. 379 с.

³⁾ Shore Protection Manual. Vicksburg : Coastal Engineering Research Center, 1984. Vol. II. 652 p.

⁴⁾ Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях. Москва : Гидрометеиздат, 1975. 239 с.

Развитие и доступность цифровых технологий, особенно в части создания новых либо использования уже существующих цифровых моделей рельефа дна, послужили предпосылкой к разработке авторами модифицированного варианта расчетной схемы известного ветроэнергетического метода (ВЭМ). Впоследствии на его основе был разработан соответствующий программный инструмент для автоматизации этапа подготовки набора региональных входных параметров.

Цель статьи – разработать программные алгоритмы и простейший инструмент для пространственных вычислений коэффициентов, определяющихся факторами воздействия внешних условий на характеристики потоков наносов.

Материалы и методы исследования

Среди расчетных методик проведения оперативной оценки направления и интенсивности потоков наносов, определяющих основные тенденции перестроения рельефа береговой зоны, следует выделить гидрометеорологические методы⁴⁾. Разработанные на основе результатов большого количества исследований и натурных наблюдений, они успешно применяются при решении практических вопросов, связанных с проведением берегозащитных мероприятий, строительством гидротехнических сооружений, обслуживанием акваторий портов и подходных каналов. Обоснование выбора конкретной расчетной схемы определяется, как правило, такими геоморфологическими характеристиками района исследований, как рельеф дна, очертания береговой линии и гранулометрический состав прибрежно-морских наносов.

На отмелях и относительно прямолинейных участках с песчано-гравийными наносами для оперативной оценки рекомендуется применение ВЭМ, который был предложен в 1930-х гг.^{5), 6)} и в дальнейшем разрабатывался и совершенствовался^{7), 8)} [7–9]. Этот метод устанавливает связь непосредственно между энергией ветрового воздействия на водную поверхность и интенсивностью перемещения наносов. В основе расчетной схемы лежит суммирование энергии, передаваемой водной среде при ветрах различных направлений по отношению к ориентации береговой линии. При этом весь диапазон направлений ветра разбивается на отдельные сектора, для каждого из которых общее выражение для передаваемой энергии записывается в виде

$$e = p \cdot W^n \cdot D^m, \quad (1)$$

где p – повторяемость ветра в пределах сектора (в относительных единицах или процентах); W – осредненная скорость ветра; D – длина разгона ветра

⁵⁾ Мунх-Петерсон И. Движение наносов вдоль берегов безливных морей : [доклад конференции] // Доклады IV гидрологической конференции Балтийских стран. Ленинград, 1933. 17 с.

⁶⁾ Глушков В. Г. Роль влияния ветра, вектор миграции, вектор перемещения наносов и вектор лобового воздействия // За рационализацию гидрологии. Ленинград : ЛГГИ, 1934. С. 13–27.

⁷⁾ Кнапс Р. Я. Гидрометеорологический метод определения характеристик режима движения песчаных наносов // Технические указания по проектированию морских берегоукрепительных сооружений на берегах с песчаными наносами. ВСН 80-62 : Утв. Техн. упр. М-ва трансп. строительства 16/VIII 1962 г. : [Срок введения 1 янв. 1963 г.]. Москва : Оргтрансстрой, 1962.

⁸⁾ Шишов Н. Д. Метод расчета мощности и потока песчаных наносов в морях и больших озерах // Труды СоюзморНИИпроекта. Москва : Морской транспорт, 1956. Т. 3. С. 45–56.

над водной поверхностью; n и m – показатели степени, которые могут варьироваться в разных условиях. В стандартном варианте для расчета значений рекомендуется использовать сектора в границах географических румбов (через 45°) либо полурумбов (через 22.5°) и вводить коэффициент полноты румбового сектора. Длина разгона ограничивается предельным значением, рассчитываемым по соотношению $D_{np} = 0.8W^2$.

Существует несколько вариантов расчетных формул, построенных на базе выражения (1), наиболее распространенными из которых являются приводимые в [7, 9]. При этом показатель степени n задается разными авторами равным двум или трем, а показатель m обычно принимается равным $1/3$. Размерность энергии e всеми авторами дается в условных единицах.

Не вдаваясь в подробности метода, которые обсуждаются в ряде работ, например [10, 11], можно систематизировать описанную выше информацию следующим образом.

Используемый в настоящее время вариант ВЭМ достаточно прост, и основным препятствием для его оперативного применения является большой объем предварительно подготавливаемых данных, характеризующихся однотипным табличным форматом. Исходя из общего подхода береговая линия исследуемого участка аппроксимируется набором прямолинейных отрезков, из середины которых в направлении моря проводится ряд лучей в направлениях от нормали к берегу до 120° в обе стороны через каждые 5° или 10° до пересечения с противоположным берегом или в отдельных случаях с границей карты. Принятый шаг рассчитан на использование данных прямых измерений скорости ветра исходя из того, что для большинства современных приборов ошибка по направлению составляет $5\text{--}10^\circ$. После этого при наличии данных по батиметрии прилежащего региона моря определяется вертикальный профиль глубин вдоль каждого из лучей, при этом пространственное разрешение данных по батиметрии, естественно, влияет на точность последующих расчетов. Таким образом, общее количество таблиц с данными для расчета составляет $m \cdot n$, где m – количество лучей, равное 25 при их интервале в 10° и 49 в случае интервала в 5° ; n – количество аппроксимированных отрезков береговой линии.

На этом заканчивается непосредственная работа с инструментом. Дальнейшие этапы, согласно вышеуказанным источникам, подразумевают геометрическое суммирование вдольбереговых составляющих, рассчитанных для всех активных секторов. По результатам суммирования производится построение векторов, характеризующих направление и относительную интенсивность вдольбереговых потоков наносов на каждом отрезке в границах исследуемого участка побережья. Подобные результаты неоднократно публиковались в открытом доступе и не являются предметом обсуждения в настоящей работе.

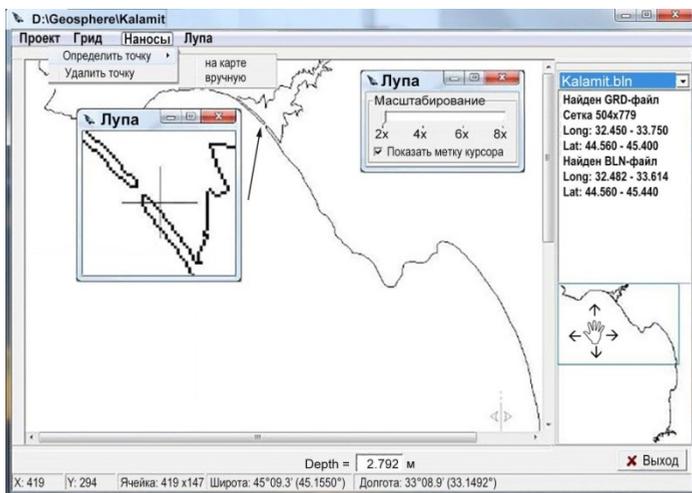
Основные результаты

С целью автоматизации всего комплекса трудоемких работ по подготовке входных данных для ВЭМ авторами был создан специализированный программный инструмент, основанный на использовании ГИС-технологий. Основной задачей инструмента является вычисление значений длины лучей разгона ветра над морской поверхностью и средних глубин по профилю дна для каждого отрезка аппроксимации береговой линии.

В качестве исходных данных в этом случае используются массивы глубин различной детализации и очертания береговой линии, охватывающие район исследований. С учетом характеристик исходных данных в качестве основных форматов при этом были выбраны представленные американской фирмой *Golden Software* информационные структуры в виде файлов контуров (*BLN*) и регулярных пространственных грид-массивов (*GRD*). Последний, по сути, представляет собой цифровую модель рельефа (ЦМР) поверхности дна. Описание структуры указанных массивов размещено в открытом доступе и свободно для загрузки из сети *Internet*⁹⁾. При этом вся работа с описываемым инструментом заключается в загрузке заранее подготовленных региональных массивов и указании географических координат середины отрезка аппроксимации береговой линии.

В разработанной для операционной системы *Windows* версии инструмента интерфейс традиционно выполнен в оконном варианте для визуализации картографической основы данных с размещением в его составе инструментов управления в виде меню и информационного табло (рис. 1).

Работа с инструментом производится в два этапа. На первом из них необходимо загрузить контур береговой линии, при этом одноименная ЦМР загружается автоматически. Процесс загрузки сопровождается визуализацией береговой линии с возможностью масштабирования, в то время как карта глубин изначально скрыта, чтобы впоследствии не загромождать отображение лучей. В нижней информационной строке отображаются характеристики ячейки грида, соответствующей текущему положению курсора на карте, которые позволяют контролировать такие величины, как широта, долгота и глубина. Соответствующее меню дополнительно позволяет вывести полную версию массива глубин в виде самостоятельной таблицы с возможностью ее интерактивного редактирования.



Р и с. 1. Пользовательский интерфейс инструмента

F i g. 1. The user interface of the software tool

⁹⁾ URL: www.goldensoftware.com (дата обращения: 30.11.2023).

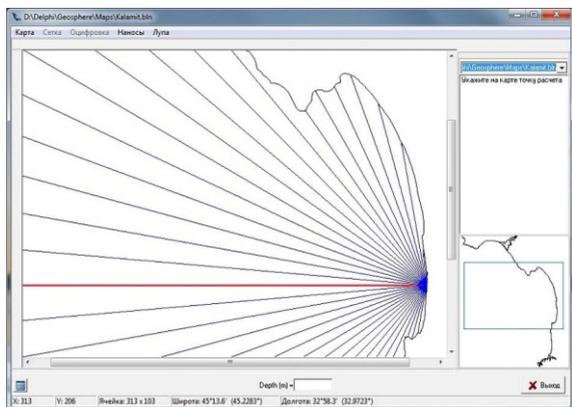
На втором этапе предполагается указание расчетной точки, расположенной вблизи береговой линии и являющейся серединой моделируемого отрезка берега. Эту информацию возможно либо ввести в цифровом виде во всплывающем окне при вызове через меню, либо указать непосредственно ее положение на карте. В этом случае для более точного позиционирования возможно использовать инструмент увеличения участка карты, в котором располагается курсор (врезка на рис. 1). Реализация этой возможности позволяет

оперативно корректировать положение задаваемой точки в случаях ее попадания на линию берега либо примыкающую к ней полосу суши.

Дальнейшая работа инструмента основана на алгоритме, представленном на примере одного из отрезков аппроксимации берега, соответствующего максимально восточной точке Каламитского залива Крымского полуострова. Получаемые после расчетов результаты в дальнейшем запоминаются для каждой точки автоматически на основании ее координат и разрешения ЦМР.

После подтверждения корректности входных данных программа автоматически выполняет построение серии лучей, начиная от центрального, заданного значением угла нормали и выделяемого в процессе визуализации красным цветом (рис. 2).

Одновременно с построением лучей вдоль проведенных секущих линий определяются профили глубины, соответствующие загруженной сетке ЦМР, по которым, в свою очередь, рассчитываются средние значения, выводимые в результирующую таблицу одновременно с координатами конечных точек лучей разгона (рис. 3).



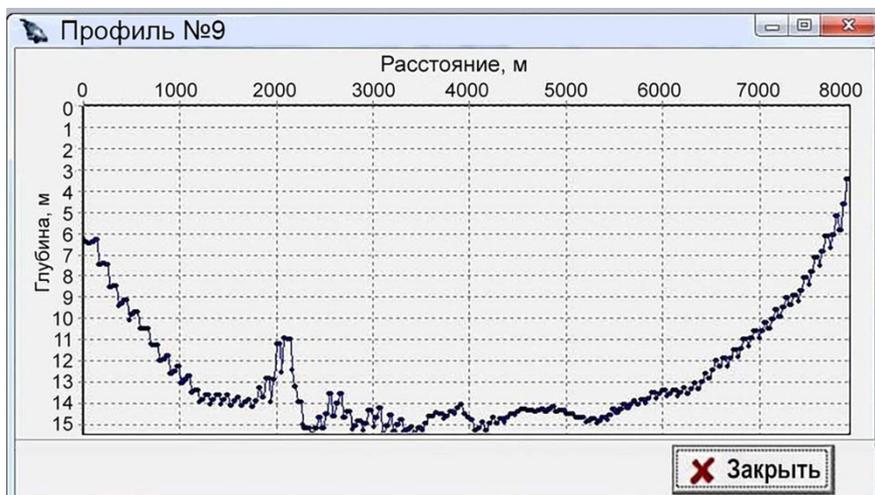
Р и с. 2. Визуализация построения лучей разгона для одного из отрезков аппроксимации береговой линии в Каламитском заливе

Fig. 2. Visualization of the construction of acceleration rays for one of the shoreline approximation segments in the Gulf of Kalamita

№	Long	Lat	D, km	Нсп. m
1	33.61483	44.90917	0.383	0.041
2	33.61483	44.90917	0.383	0.075
3	33.61483	44.90917	0.383	0.484
4	33.61483	44.90917	0.383	0.981
5	33.61149	44.90083	1.206	3.014
6	33.60815	44.89333	2.057	5.751
7	33.58813	44.84583	7.555	7.141
8	33.57144	44.83750	8.836	8.487
9	33.55976	44.84083	8.874	9.818
10	33.28273	44.56083	46.847	56.075
11	33.20420	44.55083	50.521	62.500

Р и с. 3. Результирующая таблица представления профиля дна вдоль одного из лучей разгона в Каламитском заливе

Fig. 3. The resulting table of the bottom profile along one of the acceleration rays in the Gulf of Kalamita



Р и с. 4. Пример графического представления профиля дна вдоль одного из лучей разгона в Каламитском заливе

F i g. 4. Example of a graphical representation of the bottom profile along one of the acceleration rays in the Gulf of Kalamita

Помимо этого, с целью визуального контроля профиля дна по каждому из сечений реализована возможность графического представления профиля дна в метрической системе (рис. 4).

Это позволяет при сложном рельефе оценить блокирующее влияние критических поднятий дна на передачу волновой энергии непосредственно в зону перемещения наносов. Для вычисления расстояний в этом представлении используется метод *Haversine* [12], показавший хорошие результаты в предыдущих работах авторов.

Выводы

Программный инструмент подготовки данных для модифицированного алгоритма расчета по ВЭМ использовался при исследовании структуры и параметров вдольбереговых миграций и интегрального перемещения наносов на протяженных участках береговой зоны Западного Крыма. Полученные результаты позволили уточнить схему потоков наносов и выделить особенности вдольберегового перераспределения наносов в различные сезоны года на современном этапе развития литодинамической системы данного региона.

Разработанный программный геоинформационный инструмент позволяет в автоматизированном режиме оперативно производить подготовку комплекта данных для проведения расчетов направления и относительной интенсивности вдольбереговых потоков наносов при использовании ВЭМ. Исключение трудоемких процедур работы с картографическим материалом, помимо этого, дает возможность более детально аппроксимировать береговую линию посредством увеличения количества отрезков и существенно повысить точность обработки данных о скорости ветра по направлениям в результате уменьшения ширины единичного сектора.

Модифицированный вариант схемы расчета, разработанный на основе ВЭМ, позволяет получать оценки структуры и относительной интенсивности вдольберегового транспорта наносов в широком диапазоне длин временных отрезков. При этом отрезки должны находиться в рамках общего периода исследования, определяемого длиной используемых данных о направлении и скорости ветра. Это дает возможность более детально изучить вклад в динамику наносов отдельных периодов интенсивного ветрового воздействия, в том числе на уровне отдельных штормовых событий.

Реализованная процедура автоматизированной подготовки входных данных для ВЭМ может быть использована, например, при расчетах параметров ветрового волнения по режимным характеристикам ветра, когда необходимо иметь такие исходные величины, как длины разгонов волн по открытым румбам и изменение глубин по лучам разгона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бёрд Э. Ч. Ф. Изменения береговой линии. Ленинград : Гидрометеоздат, 1990. 255 с.
2. Longinov V. V. Some Aspects of Wave Action on A Gently Sloping Sandy Beach // International Geology Review. 1964. Vol. 6, iss. 2. P. 212–227. <https://doi.org/10.1080/00206816409474613>
3. Dyer K. R. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. Chichester : Wiley, 1986. 358 p.
4. Dean R. G., Dalrymple R. A. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge : Cambridge University Press, 2001. 489 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754500>
5. Динамические процессы береговой зоны моря / Под ред. Р. Д. Косьяна, И. С. Подымова, Н. В. Пыхова. Москва : Научный мир, 2003. 320 с. doi:10.13140/RG.2.1.4589.7761
6. Smith E. R., Wang P., Zhang J. Evaluation of the CERC formula using large-scale model data // Coastal sediments 2003: Crossing disciplinary boundaries : Proceedings of the international conference. Vol. 3. Vicksburg, Mississippi, 2003. CD-ROM.
7. Кнанс Р. Я. О расчете мощности вдольбереговых потоков песчаных наносов в море // Океанология. 1968. Т. 8, вып. 5. С. 848–857.
8. Шишов Н. Д. Метод построения кривой распределения интенсивности вдольберегового перемещения песчаных наносов // Океанология. 1961. Т. 1, вып. 5. С. 915–919.
9. Правоторов И. А. О применении гидрометеорологического метода изучения вдольберегового перемещения морских наносов // Вестник МГУ. Серия 5: География. 1961. № 2. С. 28–33.
10. Иванов В. А., Удовик В. Ф. Оценка баланса интенсивности потоков наносов и основных тенденций переформирования береговой зоны на северо-восточном побережье о. Коса Тузла в 2004 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. Севастополь, 2005. Вып. 13. С. 159–178. EDN YODYSY.
11. Горячкин Ю. Н., Удовик В. Ф., Харитонова Л. В. Оценки параметров потока наносов у западного берега Бакальской косы при прохождении сильных штормов в 2007 году // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 42–51. EDN TOERXH.

12. Haversine method in looking for the nearest masjid / S. Hartanto [et al.] // International Journal of Recent Trends in Engineering and Research. 2017. Vol. 3, iss. 8. P. 187–195. doi:10.23883/IJRTER.2017.3402.PD61H

Поступила 1.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 5.09.2023 г.; принята к публикации 11.10.2023 г.; опубликована 20.12.2023 г.

Об авторах

Долотов Вячеслав Валентинович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1485-2883**, **ResearcherID: E-5570-2016**, *dolotov_v_v@mhi-ras.ru*

Удовик Владимир Федорович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-3832-2537**, **ResearcherID: AAV-7570-2020**, *udovik_uvfv@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Долотов Вячеслав Валентинович – разработка алгоритма и программная реализация инструмента, подготовка текста статьи и иллюстративного материала

Удовик Владимир Федорович – постановка проблемы, обработка и анализ данных, подготовка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.