

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 627.514.6

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-353-378

Применение численного моделирования для расчета ветрового волнения на Крюковском водохранилище

Игорь Александрович Приходько¹, Михаил Александрович Бандурин²,
Виктор Алексеевич Волосухин³, Артем Юрьевич Вербицкий⁴

^{1, 2, 3, 4}Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
Краснодар, Российская Федерация

¹prihodkoigor2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4855-0434>

²chepura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0986-8848>

³director@ibgts.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9029-7802>

⁴trd.uncle@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6930-2662>

Аннотация. Цель: тестирование возможностей применения модели ветрового волнения Simulating Waves Nearshore (SWAN) с входными характеристиками по данным метеостанции Краснодар (Пашковский) для Крюковского водохранилища. **Материалы и методы.** Исследования проводились на Крюковском водохранилище, учитывались условия образования процессов формирования средоулучшающего потенциала территории юга России, гарантирующей надежность и экологическую безопасность эксплуатации объектов в условиях повышающегося риска природных и техногенных катастроф на примере Краснодарского края. Полевые исследования и натурные испытания проведены согласно методикам Кубанского государственного аграрного университета. При моделировании заплеска нагонной волны для двух различных профилей (Северной и Западной водооградительных дамб) выполнено сравнение данных модели SWAN в одномерном варианте с данными, полученными по СП 38.13330.2012. **Результаты.** Модель SWASH обеспечивает достоверные результаты и является адекватным альтернативным вариантом расчета. Получены данные волнового поля, что обеспечивает хороший фундамент для дальнейшего изучения климатической изменчивости ветрового волнения Крюковского водохранилища. **Выводы.** В результате моделирования заплеска нагонной волны для двух исследуемых профилей установлено, что в среднем отметки существующего крепления откоса водооградительной дамбы выше заплеска в расчетный шторм в основном на 0,55–0,75 м, однако на ПК 9 + 00 установлено, что верхней отметке крепления откоса Северной водооградительной дамбы соответствует отметка заплеска. Следовательно, необходимо продолжить исследования, посвященные мониторингу инженерной защиты Крюковского водохранилища, с использованием математического моделирования, которое подтвердило эффективность и информативность применимой модели SWAN при относительно небольших затратах.

Ключевые слова: ветровое волнение, водооградительная дамба, математическое моделирование, заплеск нагонной волны, ветровой режим

Финансирование: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Кубанского научного фонда № 22-17-20001.

Для цитирования: Применение численного моделирования для расчета ветрового волнения на Крюковском водохранилище / И. А. Приходько, М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, А. Ю. Вербицкий // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 353–378. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-353-378>.



HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

Using numerical modeling for calculation of wind waves at the Kryukovskiy reservoir

Igor A. Prikhodko¹, Mikhail A. Bandurin², Viktor A. Volosukhin³,
Artem Yu. Verbitsky⁴

^{1, 2, 3, 4}Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

¹prihodkoigor2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4855-0434>

²chepura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0986-8848>

³director@ibgts.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9029-7802>

⁴trd.uncle@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6930-2662>

Abstract. Purpose: testing the possibilities of using the SWAN wind wave model with input characteristics according to the data of the Krasnodar (Pashkovskiy) weather station for the Kryukovskiy reservoir. **Materials and methods.** The studies were carried out at the Kryukovskiy reservoir, taking into account the conditions of formation of the processes of environment-improving potential formation of the territory in southern Russia, which guarantees the reliability and environmental safety of the facility operation under conditions of an increasing risk of natural and man-made disasters on the example of the Krasnodar Territory. Field studies and field tests were carried out according to the Kuban State Agrarian University methods. When modeling the surge overwash for two different profiles (Northern and Western water barrier dams), the SWAN model data in a one-dimensional version were compared with the data obtained by SP 38.13330.2012. **Results.** The SWASH model provides reliable results and is an adequate alternative calculation option. Wave field data, which provides a good foundation for further study of the climatic variability of wind waves in the Kryukovskiy reservoir have been obtained. **Conclusions.** As a result of surge overwash modeling for two profiles under study, it was found that on average, the marks of the existing water barrier dam slope are higher than the surge in the design storm, mainly by 0.55–0.75 m, however, at PK 9 + 00 it was revealed that the slope top elevation of the Northern water protection dam corresponds to the overwash mark. Therefore, it is necessary to continue research on monitoring the engineering protection of the Kryukovskiy reservoir using mathematical modeling, which confirmed the effectiveness and information content of the applicable SWAN model at a relatively low cost.

Key words: wind waves, water barrier dam, mathematical modeling, surge overwash, wind regime

Funding: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation № 22-17-20001.

For citation: Prikhodko I. A., Bandurin M. A., Volosukhin V. A., Verbitsky A. Yu. Using numerical modeling for calculation of wind waves at the Kryukovskiy reservoir. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(2):353–378. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-353-378>.

Введение. Важнейшей задачей эксплуатационных мероприятий на гидротехническом сооружении является продление его срока службы – жизненного цикла, который напрямую зависит от условий эксплуатации [1]. В связи с происходящими климатическими и сейсмическими из-

менениями в России, в т. ч. в Краснодарском крае, гидротехнические сооружения требуют проведения дополнительных исследований [2, 3]. Ярким примером происходящих изменений может служить просадка плотины Крюковского водохранилища на участке, примыкающем к селу Михайловское, которая произошла в ночь с 29 на 30 марта 2017 г. Протяженность активизированного участка составила 300 м от ПК 45 + 00 до ПК 48 + 00. На плотине вдоль гребня «мокрого» откоса и вдоль гребня рисбермы «сухого» откоса появились продольные трещины вертикального заложения шириной 5–20 см, глубиной 1,0–1,5 м и поперечные трещины просадочного типа, оконтуривающие просадочный участок. После этого началась активная часть просадки участка плотины, которая достигла в центральной части 1,5–3,5 м [4].

Аварийные ситуации на этом участке плотины происходили не менее трех раз за период эксплуатации водохранилища. По результатам анализа произошедших деформаций и инженерно-геологических изысканий можно констатировать, что активизация просадочных явлений произошла вследствие совокупности нескольких факторов [5, 6]. Одним из основных факторов является специфический литологический состав, слагающий геологический разрез и геоморфологические условия.

Крюковское водохранилище занимает площадь бывшего Крюковского лимана, располагавшегося в восточной части Закубанского плавневого массива, у южной окраины сел Михайловское, Ананьевское и ст. Львовской Северского района Краснодарского края. На севере в 7 км находится р. Кубань, на юге в 6,5 км проходит железная дорога Краснодар – Новороссийск (рисунок 1).

В административном отношении Крюковское водохранилище занимает часть территории Северского района.

В многоводные годы, такие как 1938, 1941, 1948, 1953, 1956, 1963, 1965 гг., повторяющиеся в среднем через 3 года, массив затапливался

сплошным слоем воды глубиной 0,8–3,0 м, что влекло за собой эвакуацию населения и животноводческих ферм из зоны затопления [7].



Рисунок 1 – Восточная часть Закубанского массива при полномасштабном хозяйственном освоении территорий (преобладает антропогенный рельеф)

Figure 1 – The eastern part of the Zakuban massif during full-scale economic development of the territories (anthropogenic relief prevails)

Вопрос об осушении массива Закубанских плавней встал в 20-х гг. прошлого столетия в связи с заселением территории и ее сельскохозяйственным освоением. Для исключения затопления плавневых и пахотных земель необходимо было перерегулирование паводкового стока горных рек с последующим постепенным сбросом его в р. Кубань. В 1959 г. была разработана общая схема осушения Закубанского плавневого массива, утвержденная Главводхозом Министерства сельского хозяйства РСФСР 21 июля 1960 г. Частью ее мероприятий являлось строительство Крюковского водохранилища на территории Крюковского лимана. Крюковский лиман представлял собой обширное плоское понижение площадью до 35 км² и

глубиной до 1,5 м, являющееся естественным водоприемником для восьми рек. Для ограждения примыкающих населенных пунктов от затопления водами лимана в случаях переполнения его стоком рек лиман был обвалован с северной и западной сторон, в результате чего был создан водоем с объемом около 30 млн м³. Валы существовали с 1937 г. (рисунок 2).

С течением времени высоту валов увеличивали, что повлекло за собой увеличение аккумулирующей емкости до 50–60 млн м³. Скопление в лимане такого объема воды при наличии примитивного обвалования ставило под угрозу затопления прилегающие к лиману территории с населенными пунктами и возделываемыми полями [8]. Так, начиная с 1937 г., лиман неоднократно переполнялся, горизонты воды достигали отметки 13,50 м, а емкость 70 млн м³.

Ради спасения населенных пунктов устраивался проран в западном валу и поступавший в лиман речной паводковый сток сбрасывался транзитом по плавням и пашне, расположенным севернее р. Сухой Аушедз.

Крюковское водохранилище построено в акватории одноименного лимана путем его обвалования не по всему периметру, а отдельными водоградительными дамбами общей длиной 23,4 км. Площадь водосборного бассейна Крюковского водохранилища составляет 966 км². Наполняется водохранилище стоком р. Песчанка, Иль, Бугай, Эйбза (Зыбза, Азипс), Хабль (Сухой Хабль), Ахтырь и Бугундырь, причем сток последних трех рек транспортируется в водохранилище посредством нагорного канала.

Целью настоящих исследований является тестирование возможностей применения модели ветрового волнения SWAN с входными характеристиками по данным метеостанции Краснодар (Пашковский) для Крюковского водохранилища.

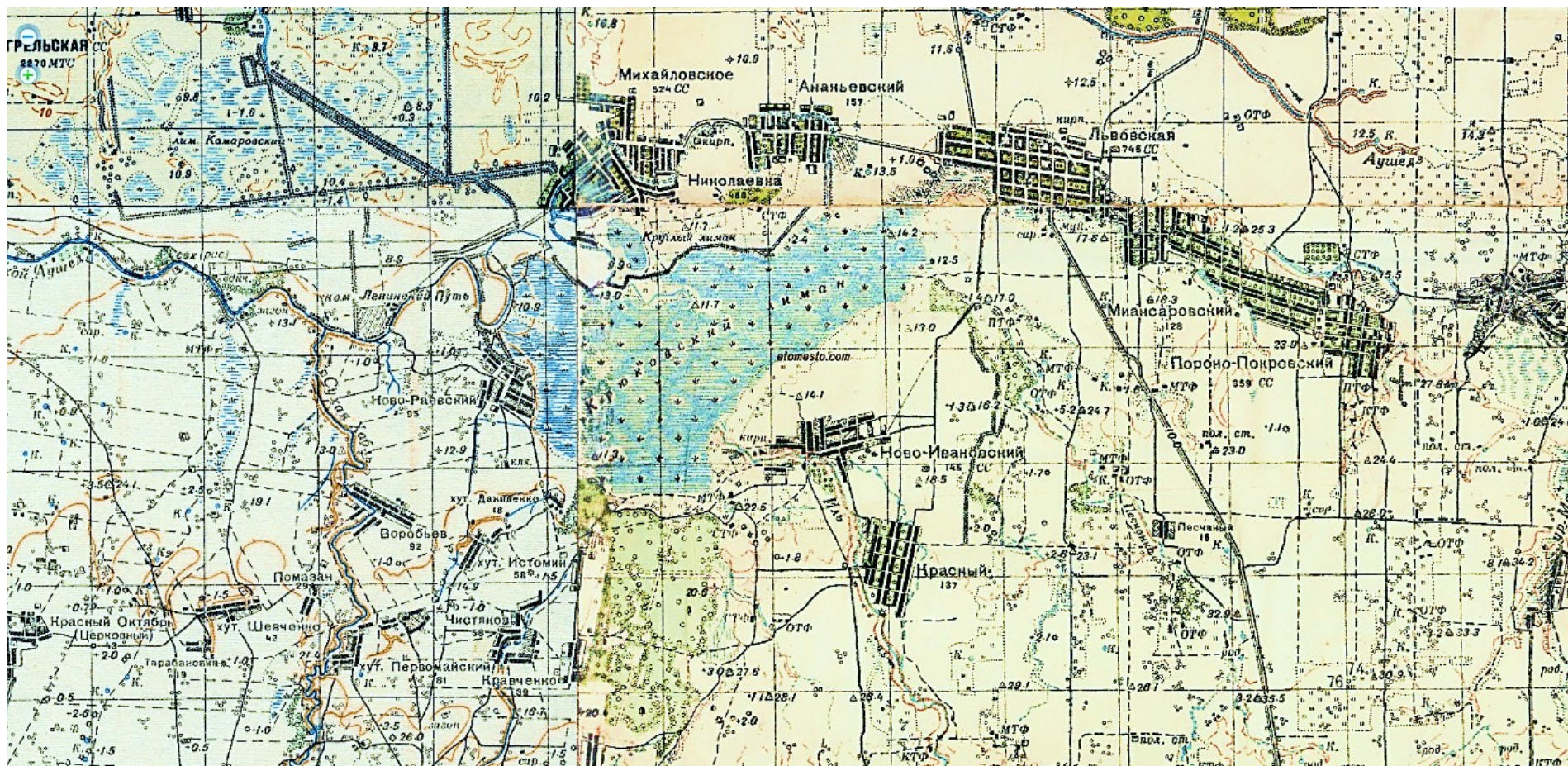


Рисунок 2 – Карта восточной части Закубанского массива до полномасштабного хозяйственного освоения территорий (антропогенный рельеф не преобладает)
Figure 2 – Map of the eastern part of the Zakuban massif before full-scale economic development of the territories (anthropogenic relief does not prevail)

Материалы и методы

Исходные данные для моделирования трансформации волн

Уровни воды. Характерные уровни Крюковского водохранилища УМО, НПУ, ФПУ 0,5% составляют 12,00; 15,04 и 17,00 м БС-77 соответственно. На период производства работ по реконструкции гидротехнических сооружений водохранилища, согласно временным «Правилам эксплуатации гидротехнических сооружений Крюковского водохранилища», характерные уровни водохранилища УМО, НПУ, ФПУ составляют 11,35; 14,40 и 16,50 м БС-77 соответственно.

Расчет элементов ветрового волнения у водооградительных дамб для гидротехнических сооружений как III, так и IV класса выполняется при максимальном уровне водохранилища 5% обеспеченности (п. 5.9 СП 38.13330.2012¹). Правилами использования водных ресурсов водохранилища этот уровень не определен, и его значение установлено по объему суточного притока воды в водохранилище в паводок 5% обеспеченности – 65,2 млн м³ (таблица 1), на фоне НПУ, при котором объем водохранилища составляет 119,4 млн м³.

Таблица 1 – Максимальные среднесуточные расходы и объемы паводочного притока в Крюковское водохранилище

Table 1 – Maximum average daily discharges and volumes of flood inflow into the Kryukovskiy reservoir

Характеристика	Среднесуточный расход воды и объем стока обеспеченностью, %				
	0,5	1	3	5	10
Расход воды, м ³ /с	412	380	327	296	259
Объем стока, млн м ³	111	96,6	74,9	65,2	52,6

При максимальном расходе водосбросного сооружения Крюковского водохранилища 75 м³/с, или 6,5 млн м³/сут, объем водохранилища в паводок 5% обеспеченности составит 178,1 млн м³, что по кривой объемов водохранилища соответствует уровню воды 5% обеспеченности 16,50 м БС-77.

¹Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82: СП 38.13330.2012: утв. Минрегионом России 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. М.: Минрегион России, 2012. 112 с.

Необходимо отметить, что в связи с заилением водохранилища максимальный уровень 16,50 м БС-77, соответствующий по проекту уровню 1% обеспеченности, в настоящее время является уровнем 5% обеспеченности.

Волновой режим. Волновой режим водохранилища, высота формирующейся волны зависят от скорости ветра, ориентации водоема относительно направления сильных ветров, что определяет длину разгона волны, глубины водоема [9–13].

Совпадение большой оси водохранилища с направлением господствующих восточных и северо-восточных ветров способствует развитию значительного волнения на водохранилище [11, 14].

Наибольшая высота волны на Крюковском водохранилище формируется при ветре восточного направления, максимальная скорость которого может быть более 30 м/с.

Значения величин, характеризующих ветровой режим исследуемой территории. Расчет элементов ветрового волнения у водооградительных дамб для гидротехнических сооружений III класса выполняется при максимальном уровне водохранилища 5% обеспеченности (п. 5.9 СП 38.13330.2012). Расчетный уровень воды $H_{5\%} = 16,50$ м БС-77 (данные об уровнях воды и ветровом режиме приведены выше). Согласно приложению Г.1 (п. л) СП 58.1330-2012² основной нагрузкой на проектируемые гидротехнические сооружения следует считать нагрузки и воздействия от расчетных волн 1% обеспеченности в расчетном шторме с частой повторяемостью. Расчетный шторм для сооружений III класса согласно п. 5.2 СП 38.13330.2012 имеет повторяемость 1 раз в 25 лет.

Нужно иметь следующие исходные параметры ветрового волнения

²Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003: СП 58.13330.2012: утв. Минрегионом России 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. М.: Минрегион России, 2012. 39 с.

(рассматривается стационарный во времени процесс развитого волнения): расчетная скорость ветра V , м/с, для волноопасных направлений. Обеспеченность расчетной скорости ветра V совпадает с обеспеченностью расчетного шторма, т. е. расчетный ветер имеет повторяемость 1 раз в 25 лет (4% обеспеченности). Исходные расчетные данные о ветровом режиме представлены в таблице 2. За основные направления ветров приняты следующие румбы: СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ.

Таблица 2 – Расчетная скорость ветра по направлениям

Table 2 – Estimated wind speed by directions

Направление ветра	Расчетная скорость ветра 4% обеспеченности V_w , м/с	Азимут, град
Северо-восток	22,0	45
Восток	31,9	90
Юго-восток	19,8	135
Юг	17,2	180
Юго-запад	22,9	225

Далее требуется расчет элементов ветрового волнения при основных волнообразующих ветрах у Северной и Западной водооградительных дамб в окрестности пикетов, указанных на рисунке 3.

Для исследования волнового климата необходимы длительные ряды данных, покрывающие всю акваторию гидротехнического объекта. Так, расчет высоты волны при проектировании гидротехнических сооружений классов III, IV выполняется по максимальной скорости ветра 4% обеспеченности (п. 5.2 СП 38.13330.2012), значения которой приняты по наблюдениям на метеостанции Краснодар – Пашковский, расположенной, как и Крюковское водохранилище, в долине р. Кубани.

Инструментальные наблюдения за волнением на водохранилище не проводились, но, по визуальным оценкам старожилов, средняя высота волн при сильном восточном ветре не превышала 0,8–0,9 м. Расчет элементов ветрового волнения при основных волнообразующих ветрах у Северной и Западной водооградительных дамб на пикетах, указанных на рисунке 3,

выполнен методом математического моделирования волнового режима водохранилища с использованием спектральной волновой модели.

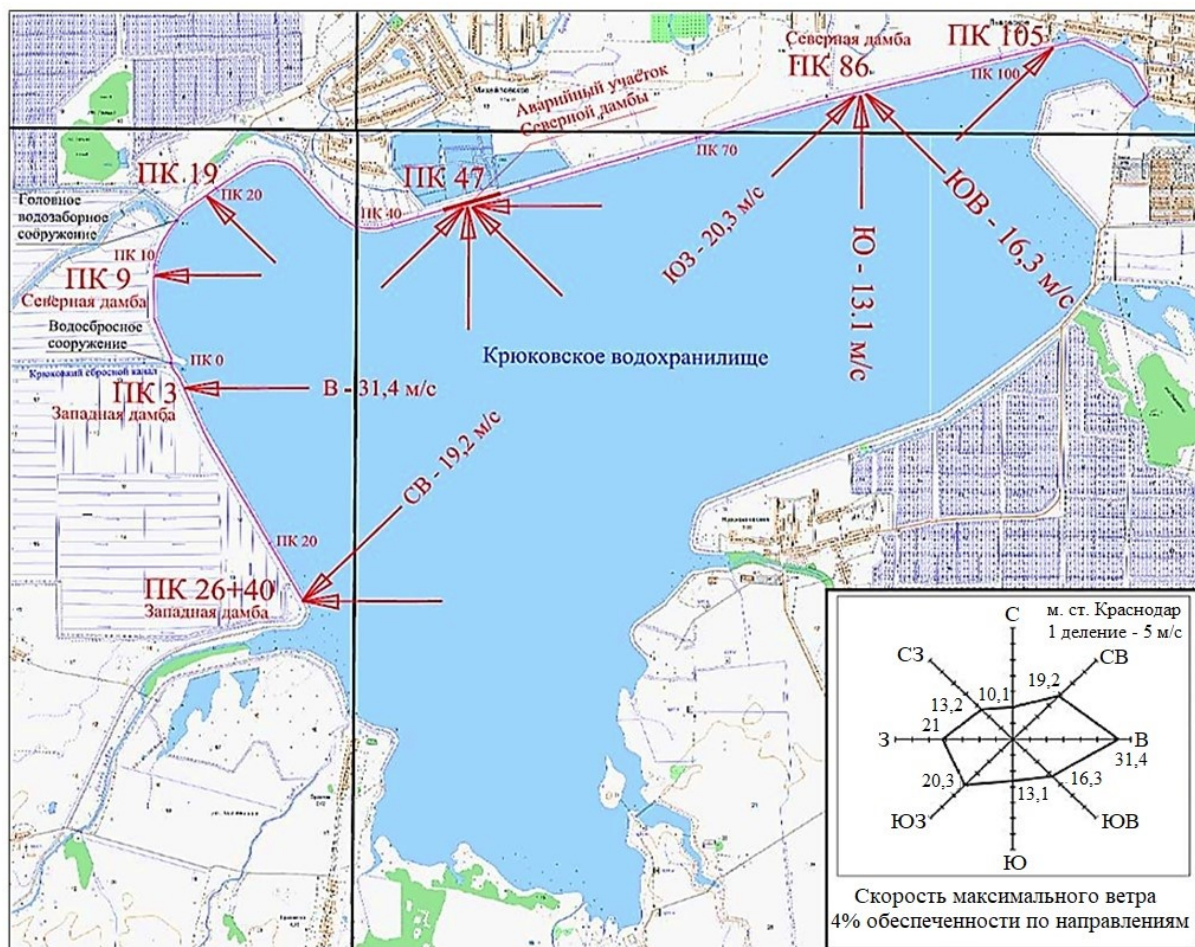


Рисунок 3 – Схема Крюковского водохранилища к расчету ветрового волнения

Figure 3 – Scheme of the Kryukovskiy reservoir for the wind wave calculation

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования трансформации волн. Для моделирования волнового поля высокого разрешения была выбрана волновая модель, позволяющая моделировать процесс возникновения и распространения волн на глубине и мелководье. Для моделирования образования и распространения волновых процессов в масштабах систем, таких как воды открытого типа и прибрежные зоны, используется модель волновых процессов с так называемым фазовым усреднением. В этом случае параметры каждой от-

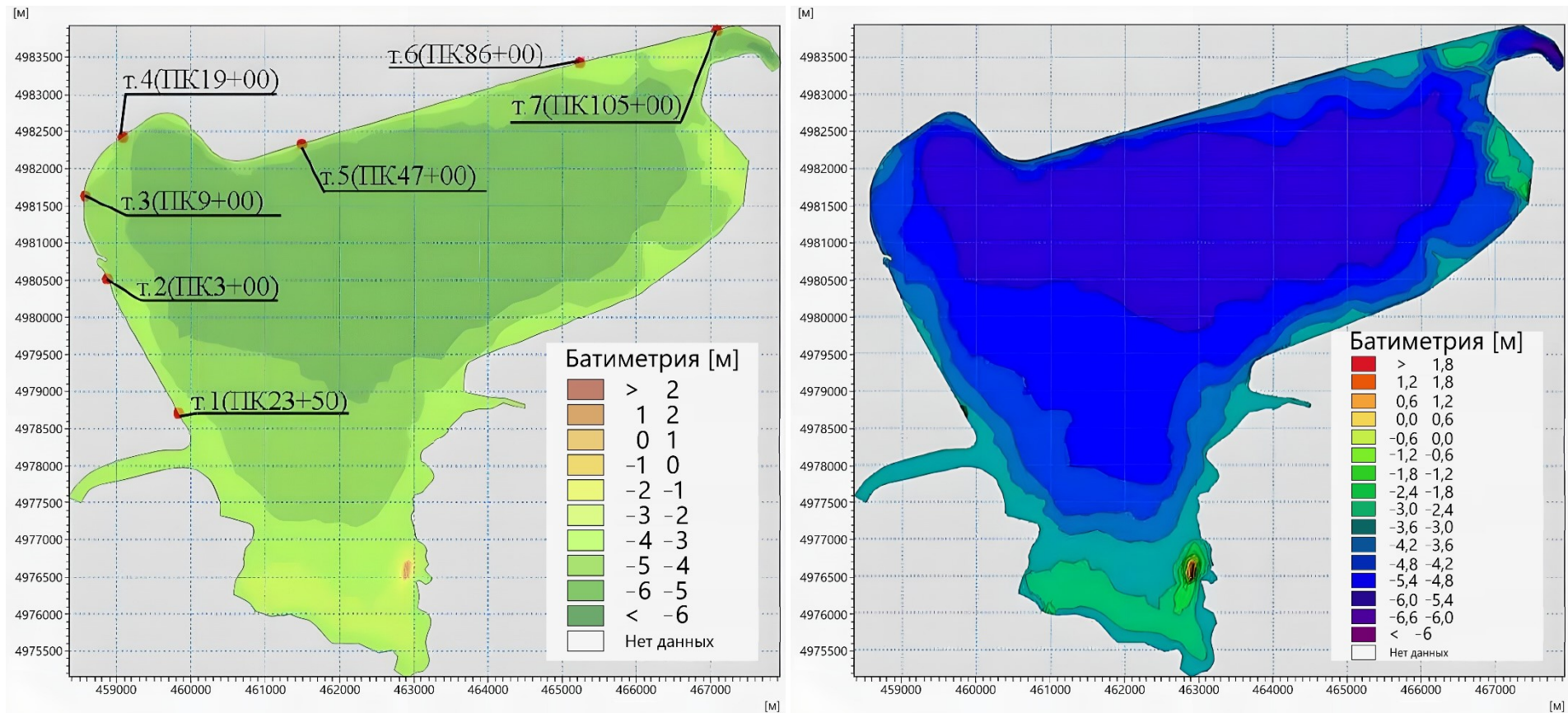
дельной волны с ее фазами рассчитываются «усредненным» способом [15]. В качестве наиболее часто используемых моделей волн с фазовым усреднением выступают так называемые волновые модели третьего поколения. В мире широко используются три модели: Wave Watch III (WW3) [16], модель WAM [17, 18] и SWAN [19].

Моделирование волнового поля выполнено в программном комплексе MIKE для уровня водоема 5% обеспеченности: $H_{5\%} = 16,50$ м БС-77. Задача решается путем применения численного моделирования с использованием волновой спектральной модели третьего поколения SWAN (Simulating Waves Nearshore), разработанной в Делфтском университете (Нидерланды). Алгоритмы модели SWAN выложены в свободный доступ в интернет^{3, 4} и открыты для широкого круга пользователей интернета. Для моделирования была использована неравномерная триангуляционная сетка, которая позволяет сократить количество расчетных узлов, соответственно, время расчетов при заданной точности выходных расчетных параметров. Сгущение узлов расчетной сетки выполнено в прибрежной зоне и на участках гидротехнических сооружений [20–22].

Результаты моделирования трансформации волнения представлены в графическом виде. На рисунке 4а показаны контрольные точки расчета параметров волн, которые характеризуют различные расчетные поперечники. На рисунке 4б приведена батиметрия всего водохранилища. Батиметрия дана в условных высотных отметках. За отметку 0,00 принят 5% уровень воды $H_{5\%} = 16,50$ м БС-77. На рисунках 5–7 приведены расчетные карты полей ветрового волнения для штормов выбранных направлений (представлены значения высоты волн расчетных штормов).

³SourceForge [Electronic resource]. URL: <https://sourceforge.net/projects/swanmodel/> (date of access: 16.02.2023).

⁴SWAN [Electronic resource]. URL: <http://www.swan.tudelft.nl/> (date of access: 16.02.2023).

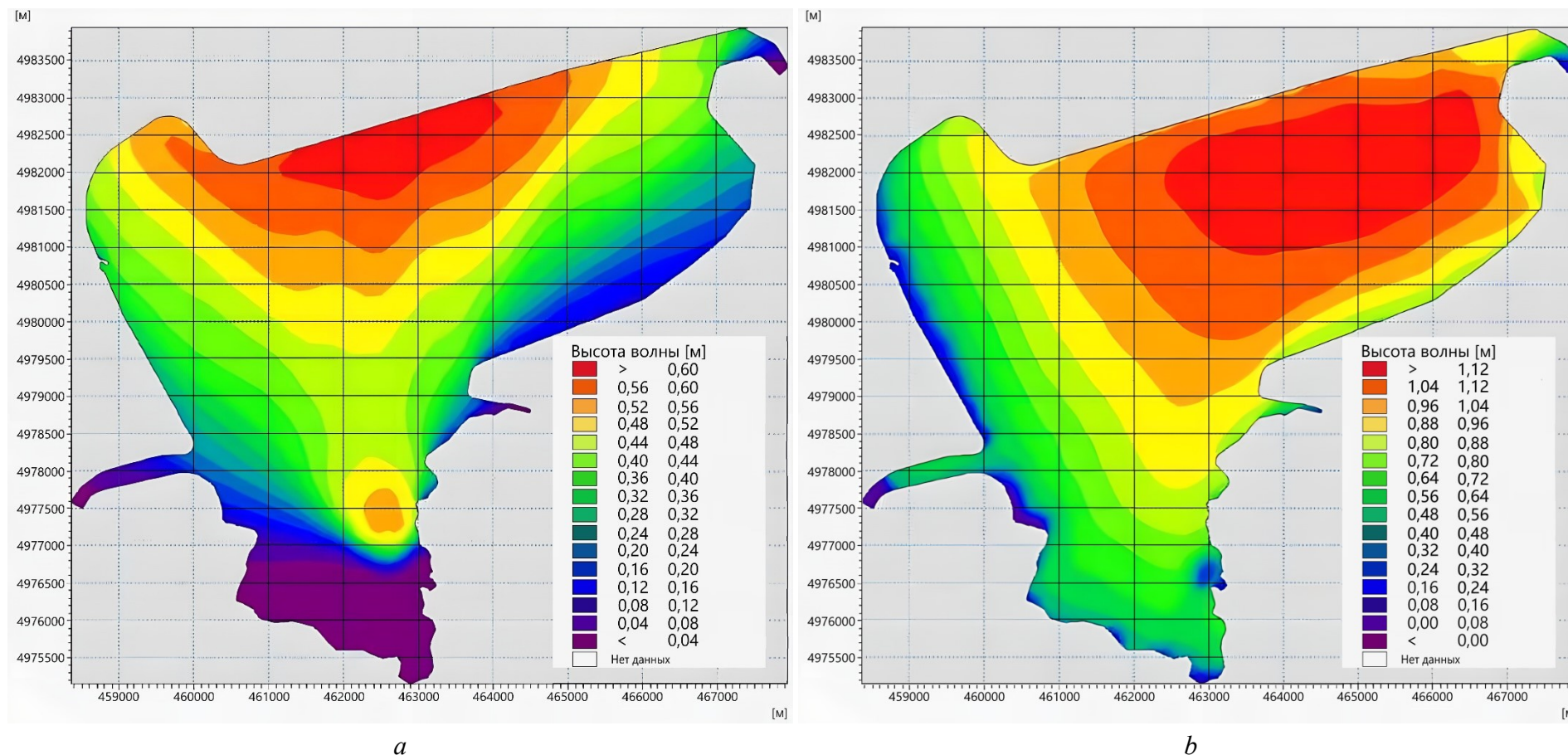


a

b

a – расположение расчетных (контрольных) точек вдоль береговой полосы
Крюковского водохранилища; *b* – батиметрия Крюковского водохранилища
a – location of design (control) points along the shoreline of the Kryukovskiy reservoir;
b – bathymetry of the Kryukovskiy reservoir

Рисунок 4 – Батиметрия Крюковского водохранилища по модели SWAN
Figure 4 – Bathymetry of the Kryukovskiy reservoir by SWAN model

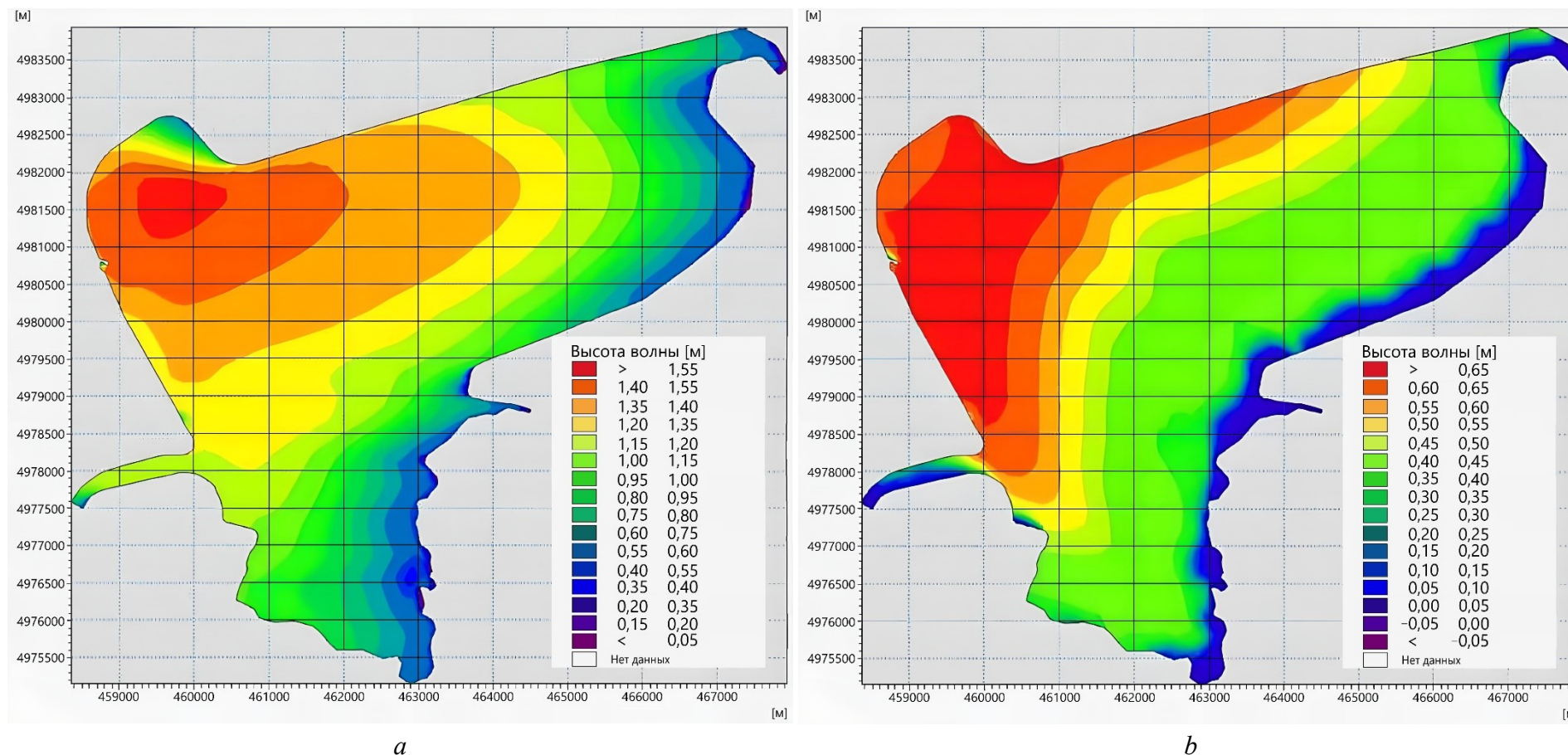


a – высота волн южного шторма, м; *b* – высота волн юго-западного шторма, м

a – south storm wave height, m; *b* – southwest storm wave height, m

Рисунок 5 – Высоты волн (м) при южном и юго-западном направлениях ветра скоростью 17,2 и 22,9 м/с

Figure 5 – Wave heights (m) in South and South-West wind directions at 17.2 and 22.9 m/s



a – высота волн восточного шторма, м; *b* – высота волн юго-восточного шторма, м

a – wave height of the east storm, m; *b* – wave height of the southeast storm, m

Рисунок 6 – Высоты волн (м) при восточном и юго-восточном направлениях ветра скоростью 31,9 и 19,8 м/с

Figure 6 – Wave heights (m) in East and South-East wind directions at 31.9 and 19.8 m/s

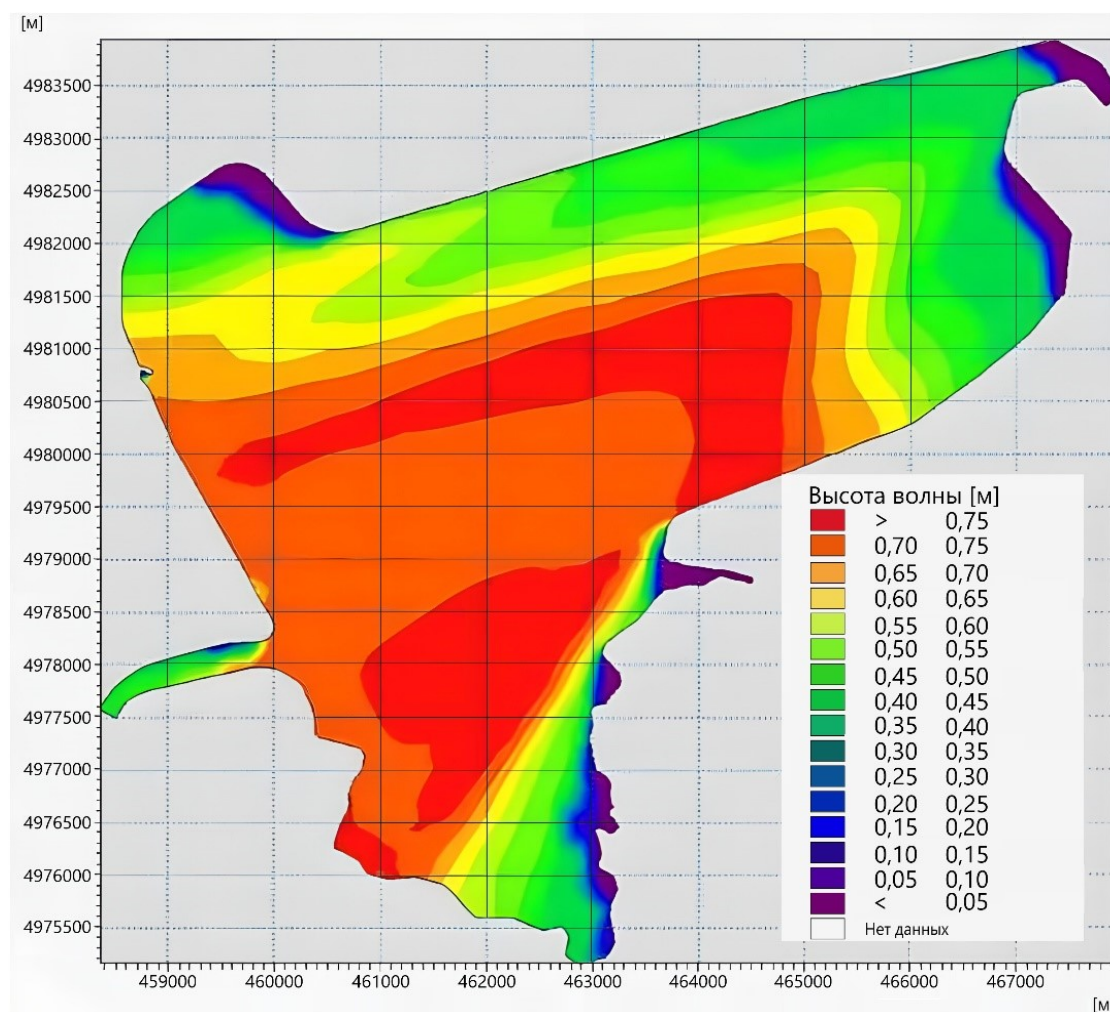


Рисунок 7 – Высоты волн (м) при северо-восточном направлении ветра скоростью 22,0 м/с

Figure 7 – Heights of waves (m) in the North-East wind direction at 22.0 m/s

Оценка средней высоты и среднего периода ветровых волн по СП 38.13330.2012. Оценка средней высоты и среднего периода ветровых волн по СП 38.13330.2012 рассмотрена при расчетном шторме восточного направления на примере створа ПК 9 + 00. Формулы нормативных документов для расчета элементов ветровых волн на мелководных водоемах базируются на фильтрационном анализе натурных данных [11, 13]. В СП 38.13330.2012 используется обобщенная зависимость для расчета средней высоты волны с учетом скорости ветра (таблица 3), разгона и глубины водоема при горизонтальном или слабонаклонном дне с уклоном менее $i = 0,001$ [14–17].

Таблица 3 – Параметры волн в расчетный шторм
Table 3 – Parameters of waves in the design storm

Характеристика	Значение						
Водооградительная дамба (С – северная, З – западная)	С	С	С	С	С	З	З
Пикет водооградительной дамбы	9 + 00	19 + 00	47 + 00	86 + 00	105 + 00	3 + 00	23 + 50
Направление ветра (В – во- сточное, ЮЗ – юго-западное)	В	В	В	ЮЗ	ЮЗ	В	В
Расчетная скорость ветра 4% обеспеченности V , м/с	31,4	16,3	31,4	20,3	20,3	31,4	31,4
Уточненная скорость ветра 4% обеспеченности V_w , м/с	31,9	19,8	31,9	22,9	22,9	31,9	31,9
Глубина d , м	4,5	4,1	4,0	3,4	3,7	4,0	2,0
Средняя высота волны H_{cp} , м	0,93	0,78	0,88	0,27	0,60	0,92	0,60
Средний период волны T_{cp} , с	3,11	2,75	2,94	3,20	3,00	3,06	2,86
Высота волны в системе $h_{1\%}$, м	1,94	1,65	1,82	1,40	1,30	1,88	1,16
Угол подхода фронта волны к линии уреза, град	1	48	69	51	54	21	20
Отметка существующего креп- ления откоса, м БС-77	17,79	17,98	18,00	18,06	18,04	17,90	18,02
Отметка заплеска при накате волны, м БС-77	17,78	17,30	17,45	17,50	17,35	17,35	17,27
Превышение верха откоса дамбы относительно отметки заплеска при накате волны, м	0,01	0,68	0,55	0,56	0,69	0,55	0,75

Полученные зависимости рассмотрим ниже.

$$fH_{cp}(d, V_w, L) = \begin{cases} b \leftarrow \left[1 - \left(\frac{1}{1 + 0,006 \cdot \sqrt{g \cdot \frac{L}{V_w^2}}} \right)^2 \right] \\ fH_{cp} \leftarrow V_w^2 \cdot \frac{0,16}{g} \cdot b \cdot \tanh \left[\frac{0,625}{b} \cdot \left(g \cdot \frac{d}{V_w^2} \right)^{0,8} \right] \end{cases},$$

где H_{cp} – средняя высота волны, м;

d – глубина, м;

V_w – уточненная скорость ветра 4% обеспеченности, м/с;

L – длина разгона волны, м;

b – безразмерный параметр, определяющий количественную зависимость средней высоты ветровых волн на воде от скорости ветра и разгона волн;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$g \cdot \frac{L}{V_w^2}$ – безразмерный разгон волны;

$g \cdot \frac{d}{V_w^2}$ – безразмерная глубина.

Для расчета среднего периода волны также существует формула из СП 38.13330.2012:

$$fT_{\text{cp}}(V_w, H_{\text{cp}}) = \frac{V_w}{g} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3,1 \cdot \left(g \cdot \frac{H_{\text{cp}}}{V_w^2} \right)^{0,625},$$

где T_{cp} – средний период волны, с;

$g \cdot \frac{H_{\text{cp}}}{V_w^2}$ – безразмерная высота волны.

Далее выполняем расчет по СП 38.13330.2012 средней высоты волны вдоль створа ПК 9 + 00 при расчетном шторме восточного направления.

Расчетные параметры волн по СП 38.13330.2012 в створе ПК 9 + 00 для шторма восточного направления:

- длина разгона по факту, м:

$$L = (467; 935; 935; 1869; 1869; 1402; 467; 467; 467) \text{ м};$$

- массив глубин по участкам, м:

$$d = (4,35; 5,53; 5,95; 6,00; 5,57; 5,57; 5,53; 4,62; 4,50) \text{ м},$$

при этом уточненная скорость ветра составляет $V_w = 31,9$ м/с.

Средняя высота волны, период и длина разгона волны в конце первого участка:

$$fH_{\text{cp}}(d_0, V_w, L_0) = 0,4 \text{ м},$$

где $fH_{\text{cp}}(d_0, V_w, L_0)$ – начальная средняя высота волны, м;

d_0 – начальная глубина, м;

L_0 – длина разгона волны по направлению расчетного ветра, м;

$$L = Find(L_0) = 445 \text{ м},$$

$$fH_{cp}(d_1, V_w, L_1) = 0,4 \text{ м},$$

где d_1 – глубина в конце первого участка, м;

$$fT_{cp}(V_w, H_{cp}) = 1,96 \text{ с},$$

$$L_1 = 1380 \text{ м},$$

где L_1 – длина разгона волны в конце первого участка, м.

Средняя высота, период и длина разгона волны в конце второго участка:

$$fH_{cp}(d_1, V_w, L_1) = 0,62 \text{ м},$$

где $fH_{cp}(d_1, V_w, L_1)$ – средняя высота волны в конце второго участка, м;

$$L = Find(L_0) = 1307 \text{ м},$$

$$fH_{cp}(d_2, V_w, L_2) = 0,62 \text{ м},$$

где d_2 – глубина в конце второго участка, м;

$$fT_{cp}(V_w, H_{cp}) = 2,59 \text{ с},$$

$$L_2 = 2242 \text{ м},$$

где L_2 – длина разгона волны в конце второго участка, м.

Средняя высота, период и длина разгона волны в конце третьего участка:

$$fH_{cp}(d_2, V_w, L_2) = 0,74 \text{ м},$$

где $fH_{cp}(d_2, V_w, L_2)$ – средняя высота волны в конце третьего участка, м;

$$L = Find(L_0) = 2217 \text{ м},$$

$$fH_{cp}(d_3, V_w, L_3) = 0,74 \text{ м},$$

где d_3 – глубина в конце третьего участка, м;

$$fT_{\text{cp}}(V_w, H_{\text{cp}}) = 2,87 \text{ с},$$

$$L_3 = 4086 \text{ м},$$

где L_3 – длина разгона волны в конце третьего участка, м.

Средняя высота, период и длина разгона волны в конце четвертого участка:

$$fH_{\text{cp}}(d_3, V_w, L_3) = 0,85 \text{ м},$$

где $fH_{\text{cp}}(d_3, V_w, L_3)$ – средняя высота волны в конце четвертого участка, м;

$$L = \text{Find}(L_0) = 5217 \text{ м},$$

$$fH_{\text{cp}}(d_4, V_w, L_4) = 0,85 \text{ м},$$

где d_4 – глубина в конце четвертого участка, м;

$$fT_{\text{cp}}(V_w, H_{\text{cp}}) = 3,11 \text{ с},$$

$$L_4 = 7086 \text{ м},$$

где L_4 – длина разгона волны в конце четвертого участка, м.

Средняя высота, период и длина разгона волны в конце пятого участка:

$$fH_{\text{cp}}(d_4, V_w, L_4) = 0,88 \text{ м},$$

где $fH_{\text{cp}}(d_4, V_w, L_4)$ – средняя высота волны в конце пятого участка, м;

$$L = \text{Find}(L_0) = 6194 \text{ м},$$

$$fH_{\text{cp}}(d_5, V_w, L_5) = 0,88 \text{ м},$$

где d_5 – глубина в конце пятого участка, м;

$$fT_{\text{cp}}(V_w, H_{\text{cp}}) = 3,21 \text{ с},$$

$$L_5 = 7596 \text{ м},$$

где L_5 – длина разгона волны в конце пятого участка, м.

Средняя высота, период и длина разгона волны в конце шестого участка:

$$fH_{\text{cp}}(d_5, V_w, L_5) = 0,9 \text{ м},$$

где $fH_{\text{cp}}(d_5, V_w, L_5)$ – средняя высота волны в конце шестого участка, м;

$$L = \text{Find}(L_0) = 9489 \text{ м},$$

$$fH_{\text{cp}}(d_6, V_w, L_6) = 0,9 \text{ м},$$

где d_6 – глубина в конце шестого участка, м;

$$fT_{\text{cp}}(V_w, H_{\text{cp}}) = 3,26 \text{ с},$$

$$L_6 = 9956 \text{ м},$$

где L_6 – длина разгона волны в конце шестого участка, м.

Средняя высота, период и длина разгона волны в конце седьмого участка:

$$fH_{\text{cp}}(d_6, V_w, L_6) = 0,9 \text{ м},$$

где $fH_{\text{cp}}(d_6, V_w, L_6)$ – средняя высота волны в конце седьмого участка, м;

$$fT_{\text{cp}}(V_w, H_{\text{cp}}) = 3,26 \text{ с}.$$

Для восьмого участка и далее решения по СП 38.13330.2012 не существует, поскольку на восьмом участке уклон дна $i = 0,0019$, что больше предельно допустимого 0,001.

Выводы. В соответствии с действующими нормативными документами, методом математического моделирования волнового режима Крюковского водохранилища с использованием современной спектральной волновой модели SWAN, которая описывает нарастание, затухание и трансформацию в прибрежной зоне ветрового волнения, учитывает рефракцию волн, трансформацию с учетом батиметрических особенностей, эффекты локального ветрового воздействия, диссипацию энергии вследствие донного трения и обрушения, а также эффекты взаимодействия волн и течений, выполнен расчет элементов ветрового волнения при основных волнообразующих ветрах у Северной и Западной водооградительных дамб.

Преобладающими в течение года являются ветры восточного

направления, довольно значительную повторяемость имеют ветры северо-восточного, западного и юго-западного направлений. Преобладающее направление сильных ветров – восточное. Максимальные уровни водохранилища 5% обеспеченности – 16,50 м, 10% обеспеченности летнего паводка – 11,60 м БС-77.

Согласно волновым расчетам, отметка заплеска в расчетный шторм в основном на 0,55–0,75 м ниже отметки существующего крепления откоса водооградительной дамбы. В расчетном створе на ПК 9 + 00 Северной водооградительной дамбы отметка заплеска (17,78 м БС-77) соответствует верхней отметке крепления откоса (17,79 м БС-77). Расчет выполнен при восточном ветре, скорость которого 1 раз в 25 лет достигает 31,4 м/с, при длине разгона волны 8,9 км. Максимальная расчетная высота волны в системе 1% обеспеченности ($h_{1\%}$) составила 1,94 м.

Угол подхода фронта волны к линии дамбы в расчетном створе на ПК 9 + 00 Северной дамбы сохраняется на участке от ПК 5 + 00 до ПК 10 + 00 Северной дамбы, и отметка заплеска здесь будет такой же – 17,78 м БС-77. На участках устройства волнозащитного парапета Северной дамбы от ПК 0 + 47 до ПК 14 + 89 и от ПК 15 + 28 до ПК 17 + 00 отметка заплеска расчетной волны от ПК 0 + 47 до ПК 5 + 00 в основном составляет 17,35 м БС-77, что на 0,55–0,65 м ниже отметки гребня водооградительной дамбы, но на подходе к ПК 5 + 00, где меняется направление дамбы, отметка заплеска увеличится до 17,78 м БС-77. От ПК 5 + 00 до ПК 10 + 00 отметка заплеска 17,78 м БС-77 совпадает с отметкой верха дамбы. От ПК 10 + 00 до ПК 17 + 00, где также меняется направление дамбы, отметка заплеска в основном 17,30 м БС-77, что на 0,70 м ниже гребня дамбы. На участке Северной дамбы от ПК 45 + 21,7 до ПК 49 + 5,07 отметка заплеска при накате расчетной волны, согласно расчету, на ПК 47 + 00 составляет 17,45 м БС-77, что на 0,55 м ниже отметки гребня водооградительной дамбы.

Список источников

1. Мониторинг безопасности водопроводящих сооружений оросительных рисовых систем юга России при возрастающих климатических изменениях / М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, А. Д. Гумбаров, И. А. Приходько. М.: Русайнс, 2022. 194 с.
2. Приходько И. А., Бандурин М. А., Якуба С. Н. Пути решения совершенствования рационального природопользования в границах мелиоративно-водохозяйственного комплекса Нижней Кубани // Роль мелиорации в обеспечении продовольственной безопасности: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 14–15 апр. 2022 г. М.: ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2022. С. 100–107.
3. Имитационное моделирование устойчивости оградительных дамб реки Псекупс в условиях возрастающих статических и сейсмических воздействий / В. А. Волосухин, М. А. Бандурин, И. А. Приходько, И. Д. Евтеева // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 5(389). С. 459–463. DOI: 10.55186/25876740_2022_65_5_459.
4. Волосухин В. А., Бандурин М. А., Приходько И. А. Изменение климата: причины, риски для водохозяйственного комплекса Краснодарского края // Природообустройство. 2022. № 4. С. 50–56. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-50-56.
5. Безопасность бесхозяйных гидротехнических сооружений. Безопасность бесхозяйных гидротехнических сооружений мелиоративного водохозяйственного комплекса / Г. Т. Балакай, И. Ф. Юрченко, Е. А. Лентяева, Г. Х. Ялалова. Германия: LAP Lambert, 2016. 85 с.
6. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Гидротехническое строительство. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2022. 313 с.
7. Волосухин В. А., Бондаренко В. Л. Факторы, определяющие безопасность гидротехнических сооружений водохозяйственного назначения // Наука и безопасность. 2014. № 3(12). С. 7–8.
8. Иваненко Ю. Г., Ткачев А. А., Гурин К. Г. Критерий гидродинамической устойчивости планового движения руслового потока // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы III Междунар. науч.-практ. интернет-конф., г. Новочеркасск, 26–28 апр. 2022 г. Новочеркасск: Лик, 2022. С. 149–160.
9. Лаппо Д. Д., Стрекалов С. С., Завьялов В. К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Л., 1990. 432 с.
10. Жарницкий В. Я., Андреев Е. В., Силкин А. М. Учет влияния волновых нагрузок при формировании модели оценки остаточного эксплуатационного ресурса ГТС // Природообустройство. 2019. № 1. С. 6–13.
11. Жарницкий В. Я., Андреев Е. В. Учет влияния инерционных и скоростных критериев волновых нагрузок в моделях оценки эксплуатационной надежности гидро-сооружений // Природообустройство. 2019. № 3. С. 62–69. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-3-62-69.
12. Кожевников М. П. Гидравлика ветровых волн. М.: Энергия, 1972. 264 с.
13. Аносов В. Н. Исследование особенностей регулярного волнения в условиях предельного мелководья // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 2(392). С. 15–23.
14. Крылов Ю. М., Стрекалов С. С., Цыплухин В. Ф. Ветровые волны и их воздействия на сооружения. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 256 с.
15. Modelling wave growth in narrow fetch geometries: The white-capping and wind input formulations / K. Christakos, J. V. Björkqvist, L. Tuomi, B. R. Furevik, O. Breivik // Ocean Model. 2021. Vol. 157. 101730. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101730>.

16. Aydoğan B., Ayat B. Performance evaluation of SWAN ST6 physics forced by ERA5 wind fields for wave prediction in an enclosed basin // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 240. 109936. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109936>.

17. Bellotti G., Franco L., Cecioni C. Regional downscaling of Copernicus ERA5 wave data for coastal engineering activities and operational coastal services // *Water*. 2021. 13(6). 859. <https://doi.org/10.3390/w13060859>.

18. Martinelli L., Ruol P., Favaretto C. Analysis of overflow and wave overtopping of the Scardovari lagoon levees // *Proceedings of the 31st International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 20–25 June 2021.

19. EX-MARE – forecasting system of natural hazards in the Azov Sea region / S. V. Berdnikov, L. V. Dashkevich, V. V. Kulygin, I. V. Sheverdyayev, I. A. Tretyakova, N. A. Yaitskaya // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. Vol. 11, № 2. P. 29–45. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-2-29-45>.

20. Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет. Программа многофакторных исследований ГТС. Проведение натурных работ по комплексному обследованию и геодезическим измерениям / О. Д. Рубин, Н. В. Ханов, С. Е. Лисичкин, А. С. Антонов. М.: РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2022. 111 с.

21. Фартуков В. А., Ханов Н. В. Технология Blockchain локального мониторинга состояния и управления гидротехническими сооружениями мелиоративных систем // *Природообустройство*. 2022. № 4. С. 96–99. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-96-99.

22. Кореновский А. М., Бакланова Д. В. Оценка риска аварии гидротехнических сооружений Тайганского водохранилища в Республике Крым // *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия*. 2016. № 2(62). С. 113–119.

References

1. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Gumbarov A.D., Prikhodko I.A., 2022. *Monitoring bezopasnosti vodoprovodyashchikh sooruzheniy orositel'nykh risovykh sistem yuga Rossii pri vozrastayushchikh klimaticheskikh izmeneniyakh* [Monitoring the Safety of Water Supply Facilities of Irrigation Rice Systems in the South of Russia under Increasing Climatic Changes]. Moscow, Rusayns Publ., 194 p. (In Russian).

2. Prikhodko I.A., Bandurin M.A., Yakuba S.N., 2022. *Puti resheniya sovershenstvovaniya ratsional'nogo prirodopol'zovaniya v granitsakh meliorativno-vodokhozyaystvennogo kompleksa Nizhney Kubani* [Ways of improving sustainable nature management within the boundaries of the Lower Kuban reclamation and water industry complex]. *Rol' melioratsii v obespechenii prodovol'stvennoy bezopasnosti: materialy mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The Role of Reclamation in Ensuring Food Security: Proceedings of the International Scientific-Practical Conf.]. Moscow, A.N. Kostyakov VNIIGiM, pp. 100-107. (In Russian).

3. Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Evteeva I.D., 2022. *Imitatsionnoe modelirovanie ustoychivosti ograditel'nykh damb reki Psekups v usloviyakh vozrastayushchikh staticheskikh i seysmicheskikh vozdeystviy* [Simulation modeling of stability of Psekups River protective barrier dams under increasing static and seismic impacts]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], no. 5(389), pp. 459-463, DOI: 10.55186/25876740_2022_65_5_459. (In Russian).

4. Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A., 2022. *Izmenenie klimata: prichiny, riski dlya vodokhozyaystvennogo kompleksa Krasnodarskogo kraya* [Climate change: causes, risks for the water management complex of the Krasnodar Territory]. *Prirodobustroystvo* [Environment Engineering], no. 4, pp. 50-56, DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-50-56. (In Russian).

5. Balakay G.T., Yurchenko I.F., Lentyaeva E.A., Yalalova G.Kh., 2016. *Bezopasnost' beskhozyaynykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Bezopasnost' beskhozyaynykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy meliorativnogo vodokhozyaystvennogo kompleksa* [Security Ownerless Hydraulic Engineering Structures. Safety of Ownerless Hydraulic Structures of Ameliorative Water Management Complex]. Germany, LAP Lambert Publ., 85 p. (In Russian).
6. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2022. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. Novocherkassk, RosNIIPM, 313 p. (In Russian).
7. Volosukhin V.A., Bondarenko V.L., 2014. *Faktory, opredelyayushchie bezopasnost' gidrotekhnicheskikh sooruzheniy vodokhozyaystvennogo naznacheniya* [Factors determining the safety of hydraulic structures for water management purposes]. *Nauka i bezopasnost'* [Science and Safety], no. 3(12), pp. 7-8. (In Russian).
8. Ivanenko Yu.G., Tkachev A.A., Gurin K.G., 2022. *Kriteriy gidrodinamicheskoy ustoychivosti planovogo dvizheniya ruslovogo potoka* [Criterion of hydrodynamic stability of the planned movement of the channel flow]. *Melioratsiya kak drayver modernizatsii APK v usloviyakh izmeneniya klimata: materialy III Mezhdunar. nauchno-prakicheskoy internet-konferentsii* [Land Reclamation as a AIC Modernization Driver under Climate Change: Proceedings of the III International Scientific-Practical Internet Conference]. Novocherkassk, Lik Publ., pp. 149-160. (In Russian).
9. Lappo D.D., Strekalov S.S., Zavyalov V.K., 1990. *Nagruzki i vozdeystviya vetrovykh voln na gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Teoriya. Inzhenernye metody. Raschety* [Loads and Effects of Wind Waves on Hydraulic Structures. Theory. Engineering Methods. Calculations]. VNIIG named after B. E. Vedenev, Leningrad, 432 p. (In Russian).
10. Zharnitsky V.Ya., Andreev E.V., Silkin A.M., 2019. *Uchet vliyaniya volnovykh nagruzok pri formirovanii modeli otsenki ostatochnogo ekspluatatsionnogo resursa GTS* [Assessment of the influence of wave loading when forming an evaluation model of the residual operational resource of HES]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 1, pp. 6-13. (In Russian).
11. Zharnitsky V.Ya., Andreev E.V., 2019. *Uchet vliyaniya inertsionnykh i skorostnykh kriteriyev volnovykh nagruzok v modelyakh otsenki ekspluatatsionnoy nadezhnosti gidrosooruzheniy* [The account of influence of inertia and speed criteria of wave loads in the assessment models of operational reliability of hydraulic structures]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 62-69, DOI: 10.34677/1997-6011/2019-3-62-69. (In Russian).
12. Kozhevnikov M.P., 1972. *Gidravlika vetrovykh voln* [Hydraulics Wind Waves]. Moscow, Energy Publ., 264 p. (In Russian).
13. Anosov V.N., 2020. *Issledovanie osobennostey regul'yarnogo volneniya v usloviyakh predel'nogo melkovod'ya* [Investigation of the features of regular waves in extremely shallow water]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of Krylov State Scientific Center], no. 2(392), pp. 15-23. (In Russian).
14. Krylov Yu.M., Strekalov S.S., Tsyplukhin V.F., 1976. *Vetrovye volny i ikh vozdeystviya na sooruzheniya* [Wind Waves and Their Impact on Structures]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 256 p. (In Russian).
15. Christakos K., Björkqvist J.V., Tuomi L., Furevik B.R., Breivik O., 2021. Modeling wave growth in narrow fetch geometries: The white-capping and wind input formulations. *Ocean Model*, vol. 157, 101730, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101730>.
16. Aydoğan B., Ayat B., 2021. Performance evaluation of SWAN ST6 physics forced by ERA5 wind fields for wave prediction in an enclosed basin. *Ocean Engineering*, vol. 240, 109936, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.109936>.

17. Bellotti G., Franco L., Cecioni C., 2021. Regional downscaling of Copernicus ERA5 wave data for coastal engineering activities and operational coastal services. *Water*, 13(6), 859, <https://doi.org/10.3390/w13060859>.

18. Martinelli L., Ruol P., Favaretto C., 2021. Analysis of overflow and wave overtopping of the Scardovari lagoon levees. *Proceedings of the 31st International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 20-25 June.

19. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Sheverdyayev I.V., Tretyakova I.A., Yaitskaya N.A., 2018. EX-MARE – forecasting system of natural hazards in the Azov Sea region. *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 11, no. 2, pp. 29-45, <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-2-29-45>.

20. Rubin O.D., Khanov N.V., Lisichkin S.E., Antonov A.S., 2022. *Mnogofaktornye issledovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy so srokom ekspluatatsii bolee 25 let. Programma mnogofaktornykh issledovaniy GTS. Provedenie naturnykh rabot po kompleksnomu obsledovaniyu i geodezicheskim izmereniyam* [Multifactorial Studies of Hydraulic Structures with a Service Life of more than 25 Years: Program of Multifactorial Studies of Hydraulic Structures Conducting Full-Scale Surveys and Geodetic Measurements]. Moscow, K. A. Timiryazev RGAU – MSHA, 111 p. (In Russian).

21. Fartukov V.A., Khanov N.V., 2022. *Tekhnologiya Blockchain lokal'nogo monitoringa sostoyaniya i upravleniya gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami meliorativnykh sistem* [Blockchain technology for local monitoring of the state and management of hydraulic structures of reclamation systems]. *Prirodooobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 96-99, DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-96-99. (In Russian).

22. Korenovsky A.M., Baklanova D.V., 2016. *Otsenka riska avarii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy Tayganskogo vodokhranilishcha v Respublike Krym* [Assessment of hydraulic structures accident risk of the Taigan reservoir in the Republic of Crimea]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(62), pp. 113-119. (In Russian).

Информация об авторах

И. А. Приходько – заведующий кафедрой строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов, кандидат технических наук, доцент;

М. А. Бандурин – декан факультета гидромелиорации, доктор технических наук, доцент;

В. А. Волосухин – профессор кафедры сопротивления материалов, доктор технических наук, профессор;

А. Ю. Вербицкий – магистрант.

Information about the authors

I. A. Prikhodko – Head of the Department of Construction and Operation of Water Management Facilities, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

M. A. Bandurin – Dean of the Faculty of Hydromelioration, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

V. A. Volosukhin – Professor of the Department of Strength of Materials, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A. Yu. Verbitsky – Master's Student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.02.2023; одобрена после рецензирования 05.05.2023; принята к публикации 11.05.2023.

The article was submitted 13.02.2023; approved after reviewing 05.05.2023; accepted for publication 11.05.2023.