

doi: 10.5862/MCE.57.1

Резонансные характеристики акваторий морских портов

*Канд. физ.-мат. наук, профессор М.И. Железняк,
Институт радиологии окружающей среды, Университет Фукусима
д-р техн. наук, профессор И.Г. Кантаржи,
Московский государственный строительный университет
научный сотрудник М.В. Сорокин,
Институт проблем математических машин и систем НАН Украины
аспирант А.И. Поляков,
Московский государственный строительный университет*

Аннотация. В статье рассмотрены современные методы определения режима низкочастотных колебаний в порту, вызывающих явление тягуна, на примере проектируемых портов: сухогрузного района морского порта Тамань и морского порта Геленджик. Для этих портов была выполнена проверка тягуноопасности согласно существующей нормативной методике, которая использует серьезные упрощения.

С целью получения резонансных характеристик акваторий портов был выполнен расчет низкочастотных волновых процессов в порту с помощью спектральной модели SWASH. В результате были получены данные о резонансных свойствах различных районов акваторий портов, важные для их проектирования. На входе в порт моделировался «белый шум», определялись коэффициенты усиления компонент спектра на важных частотах.

Показано, что предлагаемый подход позволяет получить частотные резонансные характеристики проектируемого порта. При развитии подхода возможно получение и энергетических резонансных характеристик.

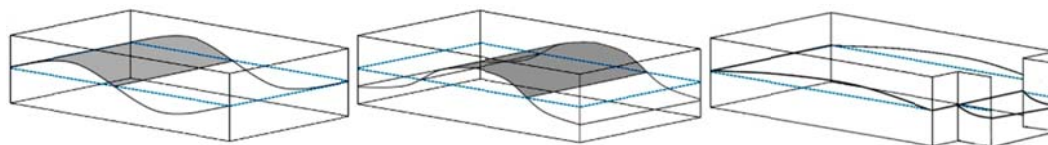
Ключевые слова: морские порты; акватория порта; низкочастотные колебания; резонансные свойства; тягун

Введение

В настоящее время при проектировании морских гидротехнических сооружений практически не учитывается динамический характер волнового воздействия. Основным нормативным документом по определению расчетных нагрузок при проектировании является СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*» [1]. В соответствии с СП расчетный волновой режим принимается в соответствии с методом характерной волны, а величины нагрузок от волнения определяются по формулам, характеризующим расчетные показатели за расчетный период с учетом коэффициентов запаса. Такой подход гарантирует надежность работы сооружения в большинстве реальных ситуаций, однако не учитывает возможные динамические эффекты. Одним из таких эффектов является резонанс собственных частот портовой акватории (сейши [2, 3]) с низкочастотными составляющими входящего волнения.

В естественных условиях для возникновения резонанса – активизации собственных частот акватории порта – необходимо наличие набегающих на порт волн таких же частот или кратных им. Резонансные колебания водной поверхности портовой акватории приводят к усилению стоячих гравитационных колебаний жидкости в замкнутых или полужамкнутых бассейнах [4–14].

При возникновении стоячих волн в бухтах водная поверхность делится на участки с ненулевой амплитудой колебаний уровня и минимальным течением (пучность) и участки с практически нулевой амплитудой, но максимальным течением (узловая линия). При этом точки смежных пучностей колеблются в противофазе. В соответствии с этим проводят классификацию сейш: 1-я мода (одноузловая), 2-я мода (двухузловая) и т. д. Особыми видами сейш являются нулевая мода или мода Гельмгольца [3], колебательная мода или мода «накачки» [9–11]. Они физически характерны только для водоемов с открытым входом и связаны с перетеканием воды из бухты в океан и обратно. В этом случае все точки водной поверхности бассейна колеблются синфазно. На рисунке 1 представлены сейши в простейшем случае прямоугольного бассейна [14].



**Рисунок 1. Сейши в прямоугольном бассейне.
Слева направо: 1-я мода, 2-я мода, мода Гельмгольца**

Опасность сейшевых колебаний состоит в том, что они могут значительно усилить ветровые сгонно-нагонные колебания в бассейне, создавая повышенную степень опасности подъемов и понижений уровня для береговой инфраструктуры. В бухтах и гаванях сейши могут генерировать интенсивные периодические течения, приводящие к опасному для пришвартованных у причалов судов явлению тягуна. Тягуном принято называть низкочастотные колебания пришвартованного к причалу судна.

Тягуны отрицательно воздействуют на устойчивость портовых сооружений и ритмичность работы портов. Перегрузочные операции во время тягуна прекращаются. Были случаи, когда тягун разрушал причальные сооружения, приводил к обрыву швартовых и даже повреждал пришвартованные суда [9, 14–16]. Способы уменьшения тягуноопасности в портах теоретически и экспериментально рассматривались в [17].

С целью недопущения тягуна в акваториях вновь проектируемых портов необходимо проводить расчеты волновых процессов и проверку тягуноопасности акваторий порта. Такие расчеты для случаев сильнейших штормов из ряда многолетних наблюдений были выполнены авторами для двух проектируемых портов: сухогрузного района морского порта Тамань [18] и морского порта Геленджик [19].

Методика определения режима низкочастотных колебаний в порту

Используемая на практике методика определения режима низкочастотных колебаний в порту, вызывающих явление тягуна, содержится в РД 31.33.02-81 «Методические указания по определению ветровых и волновых условий при проектировании морских портов» [20]. Методика основана на аналитическом решении о резонансе прямоугольной гавани [21].

Согласно РД защищенность порта от тягуна считают неудовлетворительной, если средний период сейшевых колебаний акватории находится в интервале от 0,5 до 2,5 мин, а средняя высота превышает 30 см со средней повторяемостью раз в год и чаще. Такие параметры определяются собственными частотами пришвартованных судов.

Средняя высота сейшевых колебаний акватории порта определяется по формуле:

$$\bar{h}_c = R_n \cdot h_{nc}, \quad (1)$$

где R_n – коэффициент усиления низкочастотных колебаний; h_{nc} – средняя высота низкочастотных колебаний.

Средний период сейшевых колебаний равен резонансному и определяется по формуле:

$$\bar{\tau}_c = \bar{\tau}_r = \frac{2\pi}{K_r \cdot \sqrt{g \cdot H}}, \quad (2)$$

где K_r – резонансное волновое число; H – глубина порта.

Коэффициент усиления устанавливается из отношений R_n/R_r и $\bar{\tau}_r/\bar{\tau}_{nc}$ по графику (рис. 2), где $\bar{\tau}_{nc}$ – средний период низкочастотных колебаний акватории.

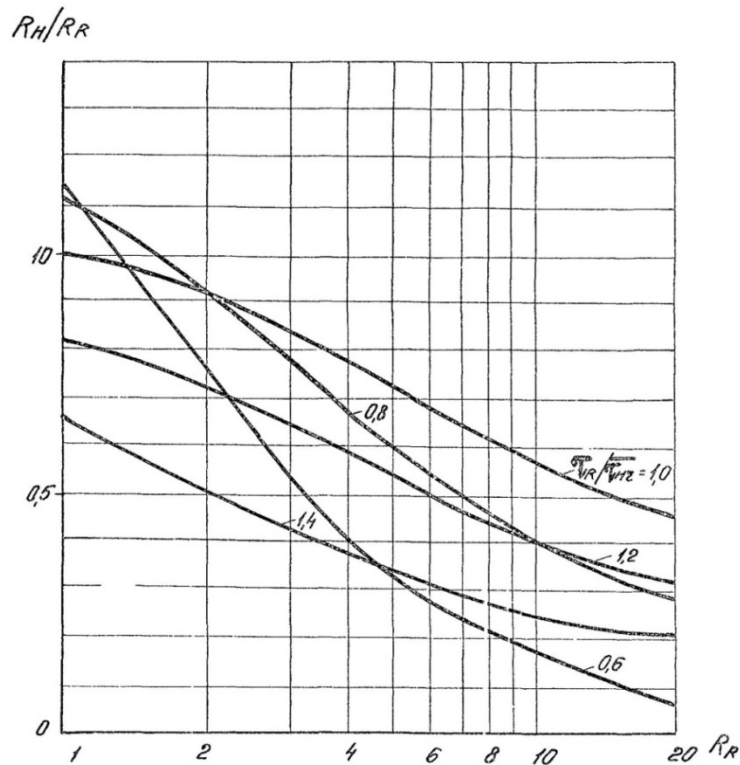


Рисунок 2. Зависимость отношения R_H / R_r от резонансного коэффициента усиления R_r при различных значениях τ_r / τ_{Hc} [19]

Средняя высота и средний период резонирующих низкочастотных колебаний на подходах к порту в узкой прибрежной зоне глубоководного водоема с уклонами дна 0,01 и более при разгонах более 100 км и устойчивых продолжительных ветрах (более суток) со скоростями более 15 м/с определяются по формулам:

$$\bar{h}_{Hc} = 11 \cdot \frac{\bar{h}^2}{g \cdot \tau^2}, \tag{3}$$

$$\bar{\tau}_{Hc} = 12 \cdot \bar{\tau}. \tag{4}$$

Средняя высота \bar{h} и средний период $\bar{\tau}$ ветровых волн определяются на основе режимных сведений об элементах таких волн в соответствии с требованиями СП 38.13330.2012.

Элементы низкочастотных колебаний на подходах к порту в широкой прибрежной зоне при глубине H (уклоны дна 0,001 и менее) определяются по формулам:

$$\bar{h}_{Hc} = 11 \cdot \frac{\bar{h}^2}{g \cdot \tau^2} \cdot f\left(\frac{H}{g \cdot \tau^2}\right), \tag{5}$$

$$\bar{\tau}_{Hc} = 12 \cdot \bar{\tau}, \tag{6}$$

где $f\left(\frac{H}{g \cdot \tau^2}\right)$ – значение функции, учитывающей влияние дна моря на высоту низкочастотных колебаний, определяется по графику (рис. 3).

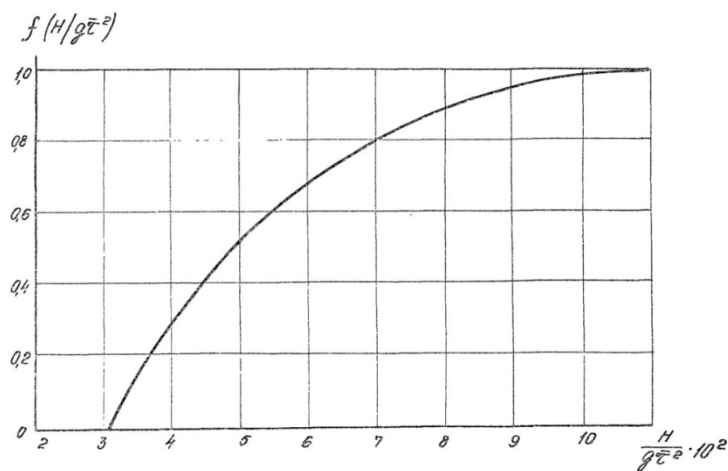


Рисунок 3. Зависимость функции $f\left(\frac{H}{g \cdot \tau^2}\right)$ от параметра безразмерной глубины моря [19]

Резонансное волновое число и резонансный коэффициент усиления для портовых акваторий, очертания которых близки к прямоугольным, определяются для заданных геометрических параметров порта $c/2d$ и $2d/l$ в соответствии со схемой и графиком (рис. 4), где c – ширина входа в порт, $2d$ и l – размеры порта в плане.

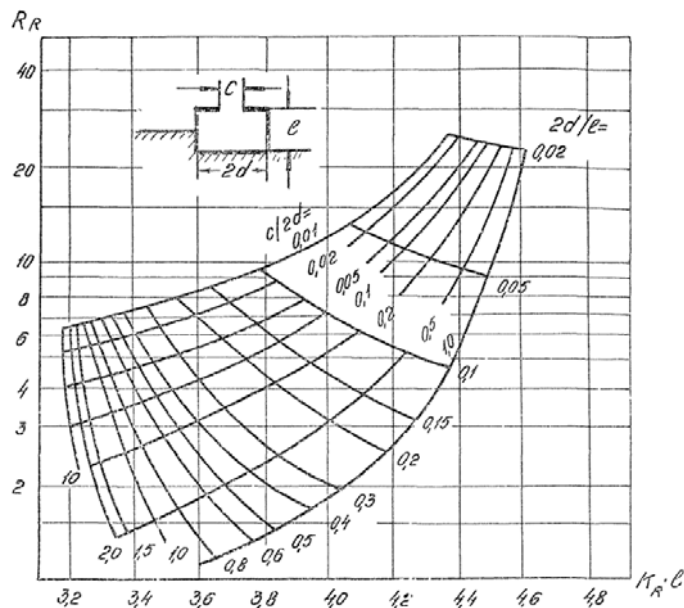


Рисунок 4. Номограмма для определения резонансного волнового числа K_r и резонансного коэффициента усиления R_r для акватории прямоугольной формы по заданным линейным размерам порта [19]

Нормативная методика определения режима низкочастотных колебаний в порту РД имеет серьезные допущения [20]: прямоугольная гавань с постоянной глубиной воды, вход в гавань меньше длины волн, все границы являются полными отражателями, применима теория волн малой амплитуды. Для портов, имеющих акватории сложного очертания, предлагается [20] численное решение уравнения Гельмгольца, описывающее линейные колебания в гавани, или моделирование резонансных явлений в лаборатории.

Кроме того, зависимости для связи между элементами низкочастотных и ветровых волн (3)–(6) используют приближенные эмпирические константы.

Более точным и практичным подходом является определение фактора усиления волновых колебаний в портовой акватории на основе спектрального моделирования волн при реальной Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Сорокин М.В., Поляков А.И. Резонансные характеристики акваторий морских портов

конфигурации порта, распределении глубин, реальных отражательных характеристиках оградительных сооружений. Для такого моделирования необходимо знать спектр волн на входе в порт.

Для определения характеристик ветровых волн на подходе к портам Тамань и Геленджик применялась спектральная модель Технического университета Дельфт (Дания) SWAN [22, 23], распространяемая в открытых кодах. В последнее десятилетие модель SWAN стала общепринятым в мировой практике береговой инженерии инструментом для расчета трансформации ветровых волн из зон глубоководья в прибрежную зону [24].

Для моделирования низкочастотных волновых процессов в акваториях сухогрузных районов морских портов Тамань и Геленджик использована длинноволновая модель SWASH [25]. Модель SWASH основана на уравнениях нелинейной теории мелкой воды, включающих, в отличие от общепринятой гидростатической версии, интеграл давления по вертикали, расчет которого проводится на каждом временном шаге, что позволяет описывать негидростатическое распределение давления по глубине. Таким образом, численная реализация модели близка к многослойным вариантам моделей, основанных на уравнениях Буссинеска [26, 27] и обеспечивает дисперсионное соотношение модели SWASH, в линеаризованном случае близкое к точному дисперсионному соотношению линейной волновой теории. Программный код модели представлен в открытом доступе. Модель активно развивается в последние годы в приложении к различным задачам волновой гидродинамики прибрежной зоны, в том числе к задачам генерации длинных инфрагравитационных волн ветровыми волнами в прибрежной зоне [28, 29], обрушения волн, формирования вдольбереговых течений, переформирования берегов.

В модели SWASH для расчетов частот собственных колебаний в акватории порта на входе в порт задаются спектральные характеристики волнения, соответствующие «белому шуму», то есть в диапазоне низких волновых частот задается спектр постоянной плотности. По результатам расчетов волновых полей в акватории порта моделью SWASH отслеживается трансформация спектра в акватории – формирование пиков спектральной плотности волновой энергии вблизи частот собственных колебаний [30].

Полученные значения изменения уровня воды не являются реальными, но их спектральный анализ дает значения собственных частот акватории.

Расчеты резонансных колебаний в акватории сухогрузного района порта Тамань

Резонансные свойства акватории порта – общие характеристики

Проектируемый морской порт располагается на Таманском полуострове на открытом побережье Черного моря. Защищенность акватории порта от волнения обеспечивается двумя сходящимися молами (рис. 5) [31].

Для определения характеристик низкочастотных колебаний у входа в порт Тамань для случаев сильных штормов 02.01.1995, 11.04.1997, 11.11.2007 и 22.11.2008 согласно РД, но с учетом спектрального режима волнения, выполнен расчет элементов ветровых волн спектральной моделью SWAN для точек 1–7, расположенных в области подходного канала (рис. 6).

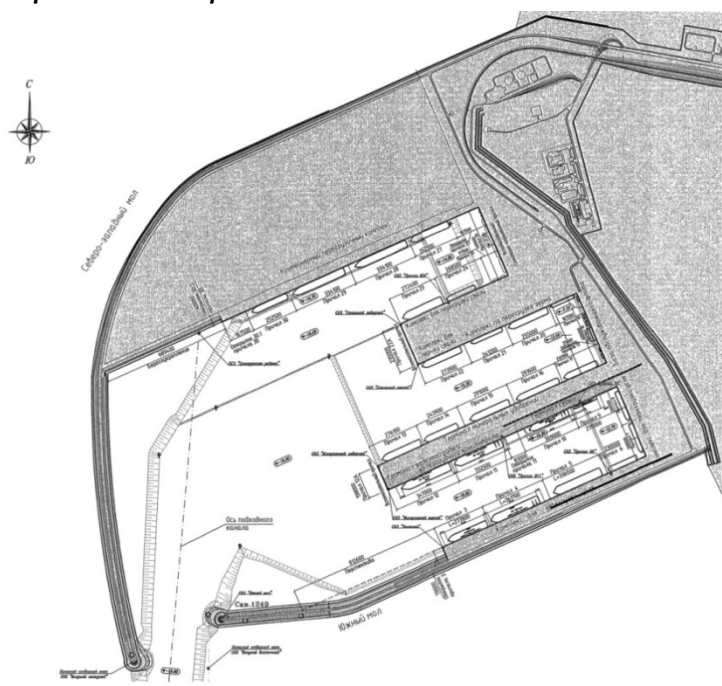


Рисунок 5. Генплан сухогрузного района порта Тамань

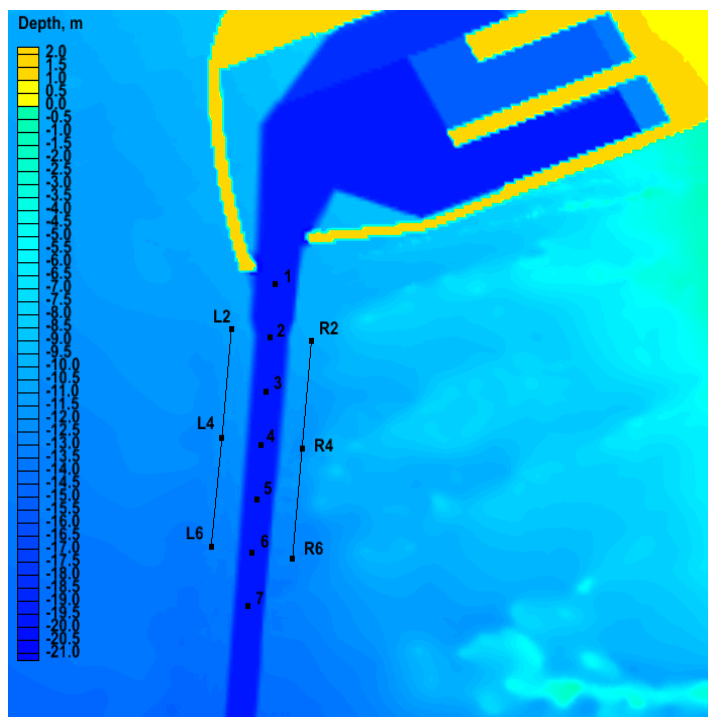


Рисунок 6. Расположение точек 1–7 на входе в проектируемый порт Тамань

Для расчета элементов низкочастотных колебаний в акватории порта $\overline{h_{нч}}$, $\overline{\tau_{нч}}$ в таблице 1 приведены значения элементов ветровых волн \overline{h} и $\overline{\tau}$ (соответствующие 50 % обеспеченности волны), а также среднее пиковое значение периода волны $\overline{\tau_p}$, используемое при определении $\overline{h_{нч}}$.

Таблица 1. Характеристики низкочастотных колебаний у входа в порт Тамань в периоды самых сильных штормов 1990–2010 гг.

Таблица 1.1. Шторм 02.01.1995

Точки	\overline{h} , м	$\overline{\tau}$, с	$\overline{\tau_p}$, с	$\overline{h_{нч}}$, м	$\overline{\tau_{нч}}$, с
1	1,91	5,99	10,50	0,037	71,88
2	1,94	6,03	10,53	0,038	72,36
3	2,02	6,16	10,56	0,041	73,92
4	2,12	6,32	10,59	0,045	75,84
5	2,20	6,44	10,62	0,048	77,28
6	2,29	6,57	10,66	0,043	78,84
7	2,35	6,66	10,68	0,054	79,92

Таблица 1.2. Шторм 11.04.1997

Точки	\overline{h} , м	$\overline{\tau}$, с	$\overline{\tau_p}$, с	$\overline{h_{нч}}$, м	$\overline{\tau_{нч}}$, с
1	2,09	4,01	10,14	0,048	72,24
2	2,12	4,06	10,15	0,049	72,72
3	2,21	4,22	10,22	0,052	74,40
4	2,31	4,40	10,24	0,057	76,20
5	2,41	4,56	10,25	0,062	77,40
6	2,50	4,72	10,44	0,064	79,44
7	2,58	4,85	10,46	0,068	80,52

Таблица 1.3. Шторм 11.11.2007

Точки	\overline{h} , м	$\overline{\tau}$, с	$\overline{\tau_p}$, с	$\overline{h_{нч}}$, м	$\overline{\tau_{нч}}$, с
1	1,98	6,24	12,55	0,03	74,84
2	2,04	6,24	12,56	0,03	74,88
3	2,13	6,40	12,57	0,03	76,80
4	2,25	6,58	12,58	0,04	78,96
5	2,36	6,73	12,59	0,04	80,76
6	2,47	6,90	12,61	0,04	82,80
7	2,56	7,03	12,61	0,05	84,32

Таблица 1.4. Шторм 22.11.2008

Точки	\overline{h} , м	$\overline{\tau}$, с	$\overline{\tau_p}$, с	$\overline{h_{нч}}$, м	$\overline{\tau_{нч}}$, с
1	1,88	5,88	11,01	0,033	70,56
2	1,91	5,93	11,01	0,034	71,16
3	2,00	6,10	11,01	0,037	73,20
4	2,12	6,30	11,00	0,042	75,60
5	2,24	6,48	10,99	0,046	77,76
6	2,36	6,65	10,99	0,050	76,20
7	2,45	6,77	10,99	0,056	79,80

Согласно данным таблицы 1, относящимся к четырем самым сильным штормам в районе проектируемого порта за 20-летний период, высота низкочастотных колебаний уменьшается при движении волн вдоль канала к створу входа в порт. У входа в порт (точка 7) высота волн составляет от 5 до 7 см. Период низкочастотных волн, наоборот, растет и достигает в точке 7 от 80 до 84 с, или около 1,4 мин.

Размеры проектируемого порта, приведенные к прямоугольному очертанию, равны: $c = 420$ м, $2d = 1450$ м, $l = 2500$ м. Глубина воды в порту – 20 м.

Для проектируемого порта Тамань резонансный коэффициент усиления равен 2,56, а резонансный период – около 316,8 с, или 5,28 мин.

Рассчитанный средний период сейшевых колебаний акватории порта Тамань значительно превышает диапазон тягуноопасных периодов. Подсчет по той же методике средней высоты сейшевых колебаний дает 14,9 см, что также меньше опасных высот в 30 см.

Таким образом, в соответствии с РД 31.33.02-81 защищенность проектируемого порта Тамань от тягуна считается удовлетворительной.

Этот вывод подтверждается и данными таблицы 1. Хотя в сильных штормах на входе в порт низкочастотная составляющая имеет периоды в тягуноопасном диапазоне, однако они не резонируют с акваторией порта, так как основная частота сейшевых колебаний акватории намного больше.

Результаты численного моделирования

На рисунке 7 показано положение выбранных точек анализа результатов расчета резонансных характеристик порта Тамань.

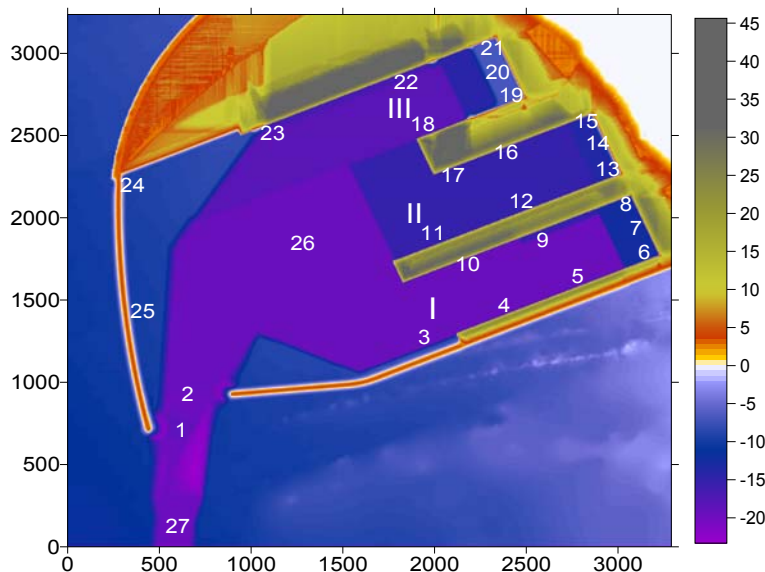


Рисунок 7. Положение контрольных точек анализа резонансных характеристик акватории порта Тамань

Для определения собственных частот акватории порта с помощью численного моделирования на южной границе задается «белый шум» с диапазоном частот $0,001 \text{ Гц} < f < 0,05 \text{ Гц}$ ($20 \text{ с} < T < 500 \text{ с}$) и постоянной плотностью энергии $E = 0,01 \text{ м}^2/\text{Гц}$. На южной, восточной и западной границах расчетной области задается абсорбирующий слой.

В точках 1–27 (рис. 7) по временному ряду изменения численно моделируемой свободной поверхности с помощью спектрального анализа находятся соответствующие спектры для предполагаемой области генерируемых низких частот $0,001 \text{ Гц} < f < 0,05 \text{ Гц}$ ($20 \text{ с} < T < 500 \text{ с}$).

На рисунках 8–12 показан рассчитанный спектр частот во всех отмеченных точках, сгруппированных по отдельным секторам внутренней акватории порта Тамань:

Входная область (рис. 8): входная точка 1, точка на подходе 27, серединная точка 26.

Северо-восточный сектор расчетной области (рис. 9): точки 23, 24 и 25.

Внутренний порт I (рис. 10): точки 3–10.

Внутренний порт II (рис. 11): точки 11–17.

Внутренний порт III (рис. 12): точки 18–22.

Черная прямая линия на этих рисунках соответствует спектру «белого шума», заданного на входной границе расчетной области.

В результате существенной трансформации волн различной длины над подходным каналом и другими неоднородностями донного рельефа начально однородное распределение энергии волн по спектру «белого шума» в заданном диапазоне частот преобразуется к входу в порт (к точке 1) в распределение с четко выраженным пиком энергии для периода 270 с и перераспределением энергии от более коротких волн к длинным с периодом более 200 с, с появлением пика на периодах около 800 с (зеленая кривая на рисунке 8).

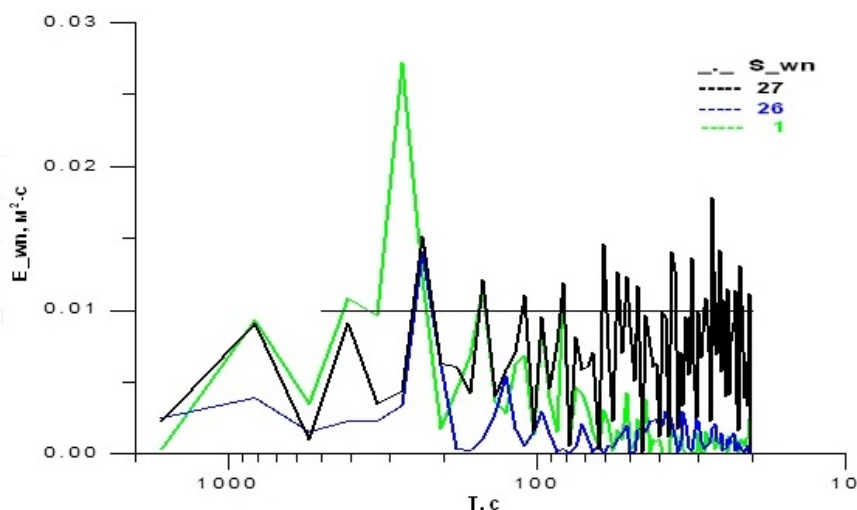


Рисунок 8. Спектры частот для точек входной области порта. Точки 1, 26 и 27

Для центральной входной зоны внутри порта (точка 26) также характерна ярко выраженная одномодальная форма спектра с близким к входному спектру (точка 1) периодом максимума энергии 240 с. При этом в обоих спектрах появляется локальный максимум на периодах 800...1000 с.

Близкую к спектру точки 26 форму имеет и спектр колебаний у причалов контейнерного порта (точка 23) (рис. 9). В точках внутренней акватории вблизи западного мола 24 и 25 кроме отмеченных пиков в спектре волн появляются, хотя и более низкие, чем в диапазоне 240...270 с, пики в диапазонах периодов 25, 35...45, 55...100 с.

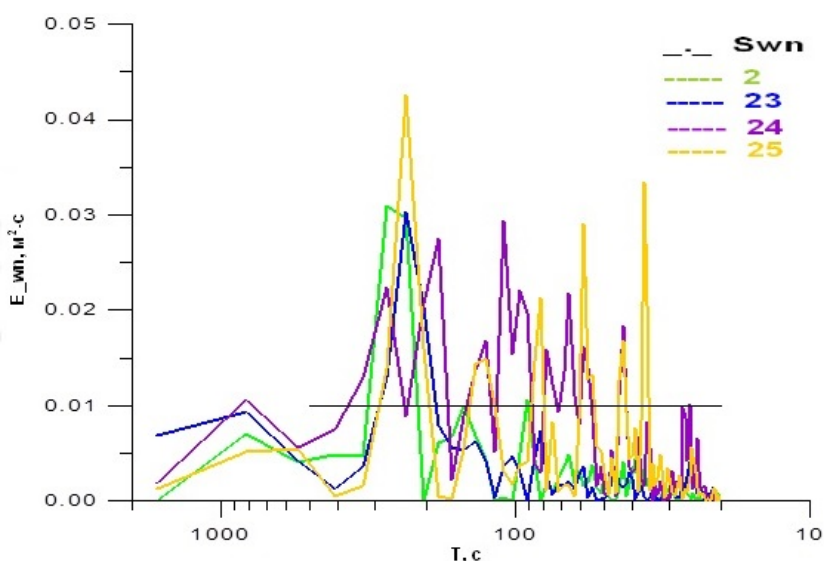


Рисунок 9. Спектры частот для точек СВ сектора порта 2, 23, 24 и 25

Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Сорокин М.В., Поляков А.И. Резонансные характеристики акваторий морских портов

Наиболее сильная трансформация из начального однородного спектра белого шума в неоднородный происходит у причальных стенок внутреннего порта I (рис. 10), для точек которого характерно распределение с очень сильно выраженным максимумом для периода 819 с. В точке 10 у внутреннего мола у входа в этот внутренний порт в спектре появляется и второй, выраженный максимум спектральной энергии для периода 200 с, близкого к резонансному в центральной части порта.

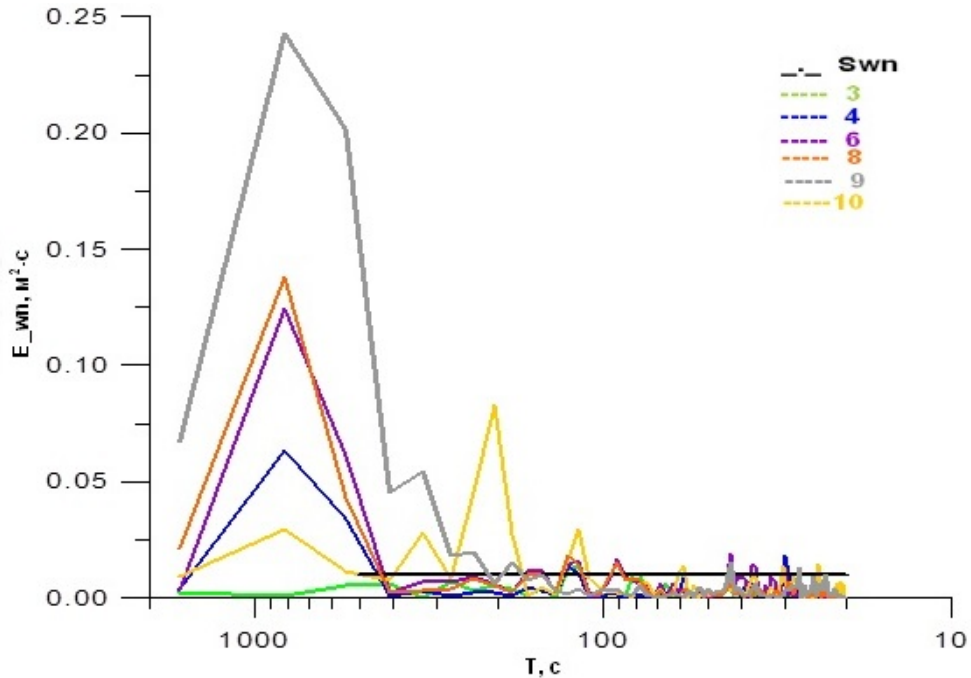


Рисунок 10. Спектры частот для точек внутреннего порта I

Во внутреннем порту II (рис. 11) основная часть энергии перераспределяется к колебаниям с периодами 15...250 с, максимум в длинноволновом диапазоне смещается в область 500...800 с и появляются небольшие пики в спектре на периодах 70, 60, 48, 38, 30 и 20 с.

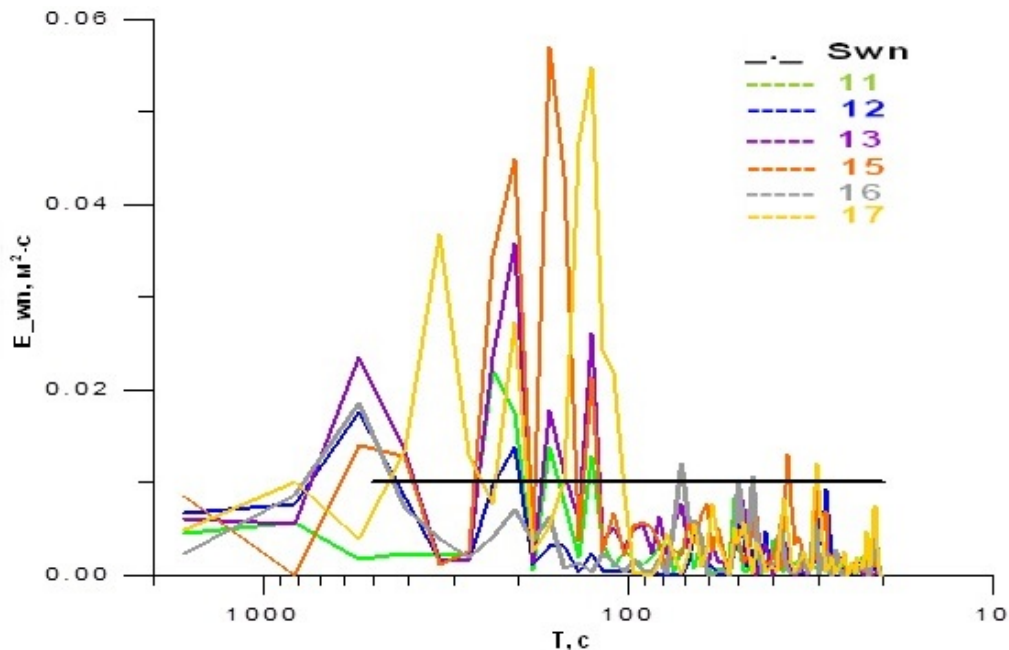


Рисунок 11. Спектры частот для точек внутреннего порта II

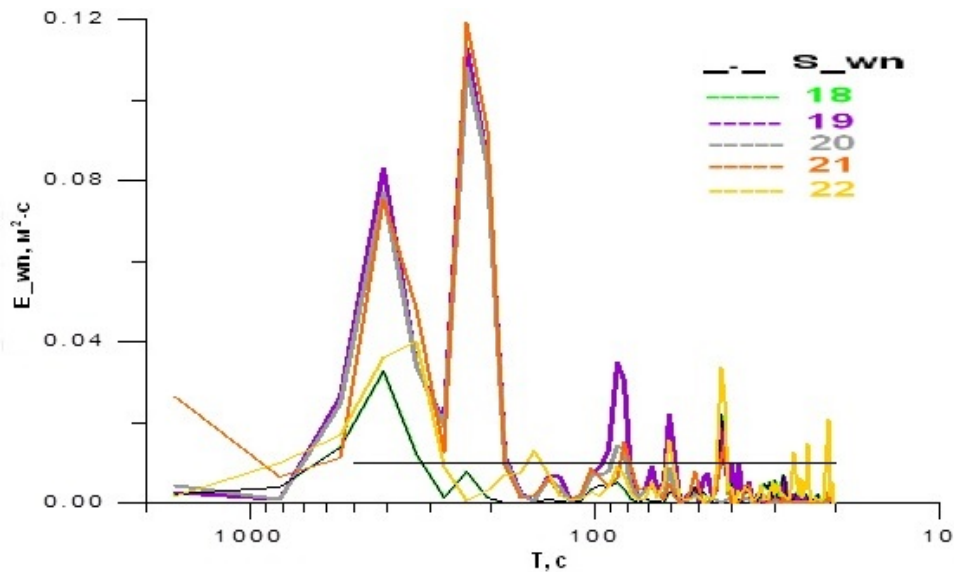


Рисунок 12. Спектры частот для точек внутреннего порта III

Для внутренних точек порта III (рис. 12) 19, 20, 21 характерны практически одинаковые спектры колебаний с ярко выраженными пиками волновой энергии на периодах 220 с (наибольший пик) и 400 с и с небольшими пиками в зоне более коротких волн с периодами 20, 40, 70 и 80...90 с.

Совмещение спектров всех контрольных точек в одном масштабе плотности энергии на общем графике (рис. 13) позволяет сделать обобщенные выводы о наиболее значимых по концентрации волновой энергии резонансных частотах акватории порта с учетом локализации различных потенциальных резонансных гармоник в различных частях акватории.

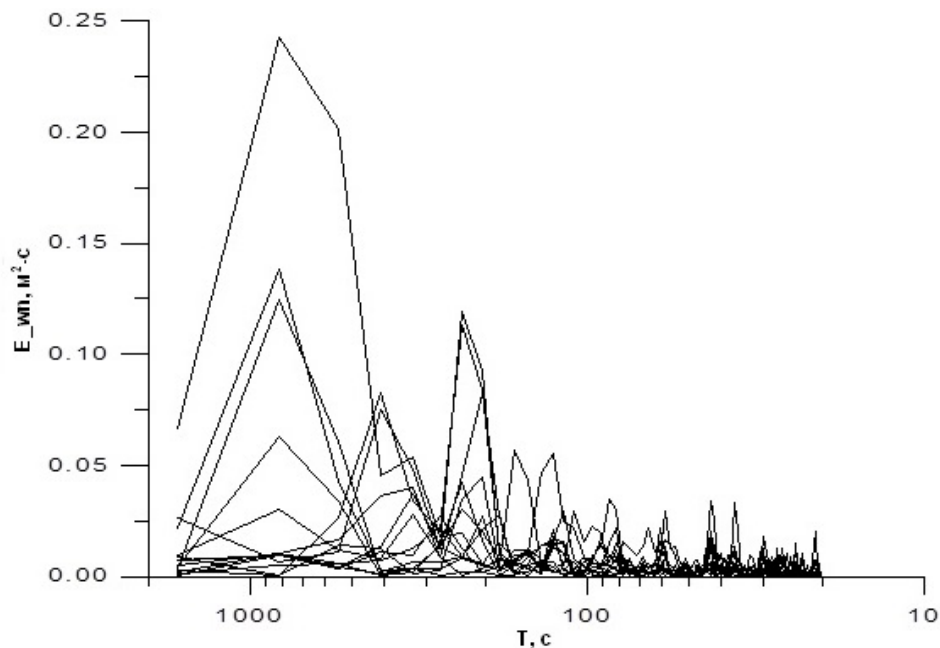


Рисунок 13. Спектры волновой энергии всех контрольных точек в едином масштабе

Период 820 с – основная резонансная гармоника Гельмгольца – проявляется максимально во внутреннем порту I и в меньшей степени в центральной части акватории. Резонанс на такой низкой частоте может возбуждаться сгонно-нагонными явлениями.

Период 400 с – близкие к полугармонике моды Гельмгольца – проявляется максимально во внутреннем порту III. Резонанс вместе с генерацией моды Гельмгольца.

Период 220 с – близкий к четверти периода моды Гельмгольца – проявляется максимально во внутреннем порту III, на входе в порт I, в порту II у причалов контейнерного порта и Западного мола. Резонанс вместе с генерацией моды Гельмгольца.

Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Сорокин М.В., Поляков А.И. Резонансные характеристики акваторий морских портов

Периоды 120 и 150 с проявляются максимально во внутреннем порту III. Резонанс маловероятен, так как эти частоты существенно превышают периоды инфрагравитационных волн, порождаемых экстремальными ветровыми волнами.

Периоды 80...85 с проявляются максимально во внутреннем порту III, у причалов контейнерного порта и у Западного мола. Период близок или совпадает с периодами инфрагравитационных волн, порождаемых экстремальными штормами на входе в порт (табл. 1) и, соответственно, высока вероятность возникновения таких колебаний при экстремальных штормах.

Периоды 60, 45, 38, 30 с – при меньшей концентрации волновой энергии могут генерироваться штормами, меньшими экстремальных, но, соответственно, с более низкой амплитудой порождаемых колебаний и меньшей интенсивностью концентрации энергии на этих частотах.

В работе [32] также делается вывод об отсутствии тягуноопасности для проектируемого порта и выполнен анализ резонансных свойств акватории по методике, близкой к описанной выше. Однако в этой работе недостаточно корректно определялись коэффициенты усиления низкочастотных составляющих спектра волнения.

Расчеты резонансных колебаний в акватории порта Геленджик

Резонансные свойства акватории порта – общие характеристики

Проектируемый морской порт располагается в защищенных естественных условиях на побережье Геленджикской бухты Черного моря, расположенной между мысами Тонкий и Толстый. Дополнительная защищенность акватории порта от волнения обеспечивается сходящимися молом и мол-причалом (рис. 14) [33].

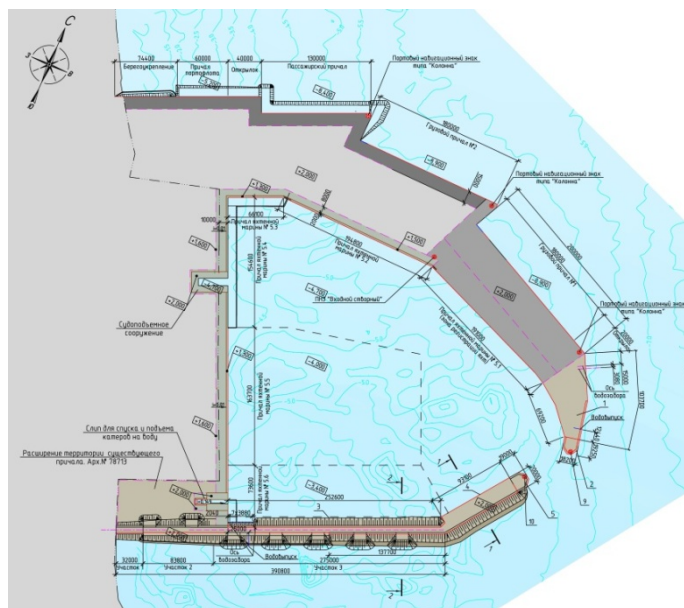


Рисунок 14. Генплан порта Геленджик

Для определения характеристик низкочастотных колебаний у входа в порт Геленджик для случаев выделенных сильных штормов 07.12.1989, 25.01.1993, 30.12.2001, 31.01.2003 и 11.11.2007 согласно РД, но с учетом спектрального режима волнения, выполнен расчет элементов ветровых волн спектральной моделью SWAN для точек 1–5, расположенных в области входа в порт (рис. 15).

Для расчета элементов низкочастотных колебаний акватории порта $\overline{h_{нч}}$, $\overline{\tau_{нч}}$ в таблице 2 приведены значения элементов ветровых волн \overline{h} и $\overline{\tau}$ (соответствующие 50 % обеспеченности волны), а также среднее пиковое значение периода волны $\overline{\tau_p}$, используемое при определении $\overline{h_{нч}}$.

Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Сорокин М.В., Поляков А.И. Резонансные характеристики акваторий морских портов

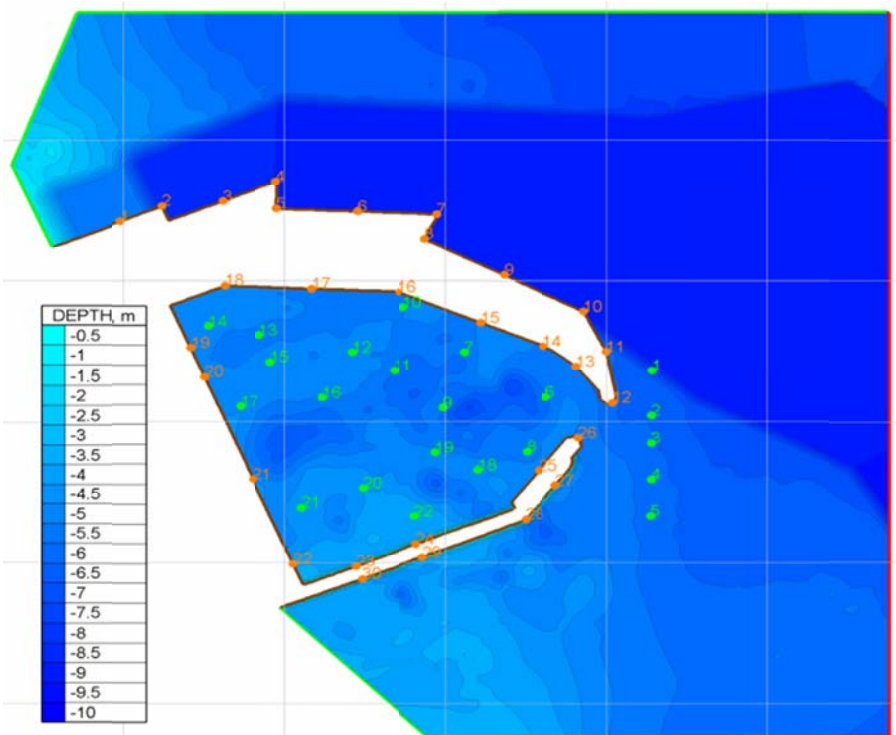


Рисунок 15. Расположение точек 1–5 вблизи проектируемого порта Геленджик

Таблица 2. Характеристики низкочастотных колебаний у входа в порт Геленджик в периоды самых сильных штормов 1989–2012 гг.

Таблица 2.1. Шторм 07.12.1989

Точки	\bar{h} , м	$\bar{\tau}$, с	$\bar{\tau}_p$, с	$\bar{h}_{нч}$, м	$\bar{\tau}_{нч}$, с
1	1,38	10,54	11,07	0,017	126,48
2	1,39	10,57	11,10	0,017	126,84
3	1,36	10,58	11,11	0,017	126,96
4	1,31	10,57	11,10	0,015	126,84
5	1,28	10,57	11,10	0,015	126,84

Таблица 2.2. Шторм 25.01.1993

Точки	\bar{h} , м	$\bar{\tau}$, с	$\bar{\tau}_p$, с	$\bar{h}_{нч}$, м	$\bar{\tau}_{нч}$, с
1	1,35	9,82	10,31	0,019	117,84
2	1,36	9,83	10,32	0,019	117,96
3	1,32	9,83	10,33	0,018	117,96
4	1,28	9,83	10,32	0,017	117,96
5	1,25	9,83	10,32	0,016	117,96

Таблица 2.3. Шторм 30.12.2001

Точки	\bar{h} , м	$\bar{\tau}$, с	$\bar{\tau}_p$, с	$\bar{h}_{нч}$, м	$\bar{\tau}_{нч}$, с
1	1,39	10,64	11,17	0,017	127,68
2	1,40	10,66	11,19	0,018	127,92
3	1,37	10,66	11,20	0,017	127,92
4	1,32	10,67	11,20	0,016	128,04
5	1,29	10,67	11,20	0,015	128,04

Таблица 2.4. Шторм 31.01.2003

Точки	\bar{h} , м	$\bar{\tau}$, с	$\bar{\tau}_p$, с	$\bar{h}_{нч}$, м	$\bar{\tau}_{нч}$, с
1	1,46	10,32	10,83	0,020	123,94
2	1,47	10,49	11,01	0,020	125,88
3	1,44	10,49	11,01	0,019	125,88
4	1,38	10,49	11,01	0,018	125,88
5	1,35	10,48	11,01	0,017	125,76

Таблица 2.5. Шторм 11.11.2007

Точки	\bar{h} , м	$\bar{\tau}$, с	$\bar{\tau}_p$, с	$\bar{h}_{нч}$, м	$\bar{\tau}_{нч}$, с
1	1,46	10,19	10,70	0,021	122,28
2	1,47	10,45	10,98	0,020	125,40
3	1,43	10,45	10,98	0,019	125,40
4	1,38	10,45	10,97	0,018	125,40
5	1,35	10,44	10,96	0,017	125,28

Согласно данным таблицы 2, относящимся к пяти самым сильным штормам за 23-летний период в районе проектируемого порта, высота низкочастотных колебаний у входа в порт составляет от 1,5 до 2,1 см, а период – от 118 до 128 с, или около 2,1 мин.

Размеры проектируемого порта, приведенные к прямоугольному очертанию, равны: $c = 50$ м, $2d = 300$ м, $l = 500$ м. Глубина воды в порту – 6 м.

Для проектируемого порта Геленджик резонансный коэффициент усиления равен 3,0, а резонансный период около 118 с, или 1,97 мин. То есть по резонансной частоте проектируемый порт находится в опасной зоне.

Однако подсчет по той же методике средней высоты сейшевых колебаний дает всего 3 см, что значительно меньше опасных высот в 30 см.

Таким образом, в соответствии с РД 31.33.02-81, защищенность проектируемого порта Геленджик от тягуна «нельзя считать неудовлетворительной». Проектируемый порт защищен от тягуна благодаря расположению в бухте, которая фильтрует, в том числе, низкочастотное волнение до входа в порт.

Этот вывод подтверждается и данными таблицы 2. Хотя при сильных штормах на входе в порт низкочастотная составляющая имеет периоды в тягуноопасном диапазоне, их высота составляет всего около 2 см.

Интересно сравнить тягуноопасность проектируемого порта с данными для порта Туапсе, который наиболее подвержен тягуну (резонансный коэффициент усиления $R_R = 2,5$, резонансный период около $T_R = 78$ с), и для порта Сочи в старой конфигурации, который меньше подвержен тягуну, хотя находится в сходных гидрометеорологических условиях с портом Туапсе: $R_R = 2,0$, резонансный период около $T_R = 140$ с.

Результаты численного моделирования

На рисунке 16 показано положение точек анализа результатов расчета резонансных характеристик акватории порта Геленджик.

Для определения собственных частот акватории порта с помощью численного моделирования на южной границе области G_r входным условием является однонаправленный спектр «белого шума» с диапазоном частот $0,001 \text{ Гц} < f < 0,05 \text{ Гц}$ ($20 \text{ с} < T < 500 \text{ с}$) и постоянной плотностью энергии $E = 0,01 \text{ м}^2/\text{Гц}$. Кроме того, на южной границе расчетной области G_r задается абсорбирующий слой, остальные границы являются открытыми.

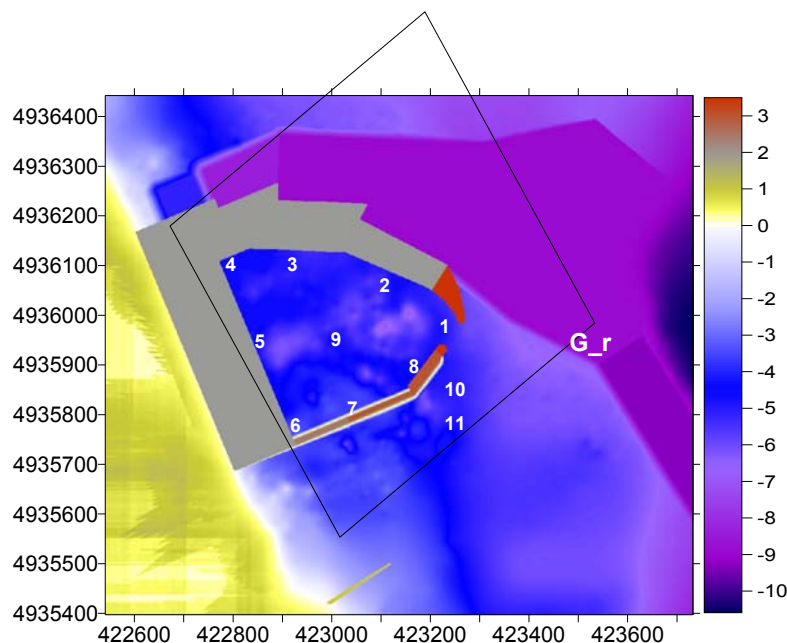


Рисунок 16. Положение контрольных точек анализа резонансных характеристик акватории порта Геленджик

В точках 1–9 (рис. 16) по временному ряду изменения численно моделируемой свободной поверхности с помощью преобразования Фурье и линейного спектрального анализа волн находятся соответствующие спектры для предполагаемой области генерируемых низких частот $0,001 \text{ Гц} < f < 0,05 \text{ Гц}$ ($20 \text{ с} < T < 500 \text{ с}$).

На рисунках 17 и 18 показано распределение спектральной плотности волновой энергии как функции частот и периодов в контрольных точках соответственно.

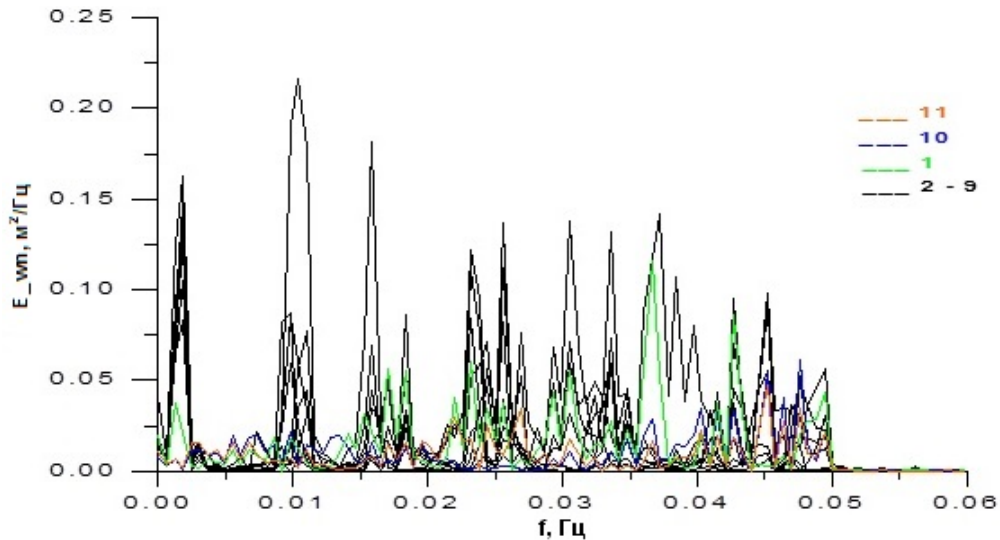


Рисунок 17. Спектры волновой энергии как функции частот в контрольных точках порта

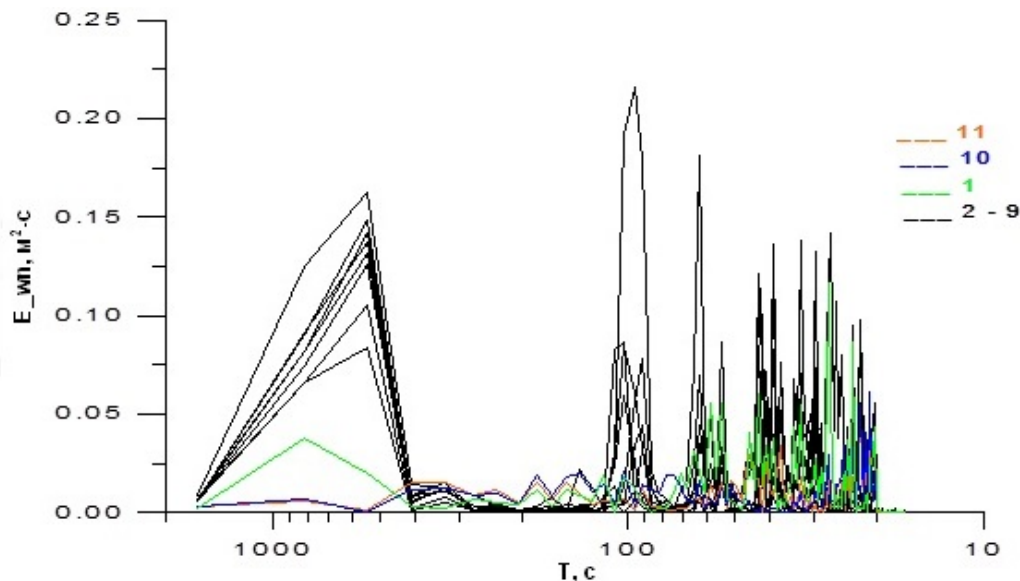


Рисунок 18. Спектры волновой энергии как функции периодов в контрольных точках порта

Совмещение спектров всех контрольных точек в одном масштабе плотности энергии на общем графике (рис. 17, 18) позволяет сделать обобщенные выводы о наиболее значимых по концентрации волновой энергии резонансных частотах акватории порта. Здесь красным цветом выделен спектр в точке окрестности входной границы, синим – спектр в точке между входной границей и входом в порт, зеленым – волновой спектр, соответствующий контрольной точке 1, находящейся у входа в порт с внутренней стороны. Черным цветом обозначены спектры в контрольных точках 2–9 внутри порта. Максимальные значения спектральной плотности достигаются в диапазоне первой и второй моды собственных осцилляций соответственно для 96 с (0,0104 Гц) и 63 с (0,016 Гц). При этом нулевая мода Гельмгольца составляет 546 с (0,0018 Гц).

В таблице 3 представлены диапазоны частот и соответствующих периодов, где наблюдается концентрация спектральной плотности волновой энергии и ее рост по сравнению с заданным ее постоянным значением на входной границе расчетной области.

Таблица 3. Диапазоны резонансных частот в точках 1–9

Моды	Диапазон частот (1/с)	Диапазон периодов (с)
0	0,0018	546
1	0,009–0,012	111-83
2	0,015–0,018	67-56
3	0,023–0,026	43-38
4	0,028–0,033	36-30
5	0,036–0,04	28-25
6	0,043–0,045	23-22
7	0,047–0,048	21

Следует отметить, что мода Гельмгольца имеет значительную концентрацию плотности волновой энергии для всех контрольных точек 2–9 внутри порта.

Выводы

1. Для определения резонансных характеристик акваторий портов проектировщики используют РД 31.33.02-81 «Методические указания по определению ветровых и волновых условий при проектировании морских портов» 1981 г. Эти рекомендации разработаны на основе аналитического решения для резонанса акватории гавани. Естественно, аналитическое решение и вслед за ним расчетный метод нормативной методики определения режима низкочастотных колебаний в порту используют серьезные допущения: прямоугольная гавань с постоянной глубиной воды, вход в гавань меньше длины волн, все границы являются полными отражателями, применима теория волн малой амплитуды. Метод не позволяет учесть реальную конфигурацию акватории порта, наличие внутренних районов в порту, конструктивные особенности оградительных и причальных сооружений, приводящие к частичному отражению волн, нелинейные волновые эффекты.

2. Предлагается определять фактор резонансного усиления волновых колебаний в портовой акватории на основе спектрального моделирования волн при реальной конфигурации порта, распределении глубин в порту, реальных отражательных характеристиках оградительных сооружений. Для моделирования низкочастотных волновых процессов в акваториях порта использована длинноволновая модель SWASH. Так как спектр волн на входе в порт неизвестен, то в створе входа задается спектр в виде белого шума, расчет трансформации которого на акватории порта позволяет определить резонансные частоты и коэффициенты усиления для различных внутренних точек порта.

3. Практическая значимость результатов работы в том, что, во-первых, уже на этом этапе метод позволяет сравнить по резонансным характеристикам варианты с различным плановым расположением оградительных сооружений, конструкцией внутренних поверхностей, батиметрией акватории порта. В дальнейшем, при известном спектре волн на входе в порт, методика позволяет получить полную картину резонансных свойств акватории, включая высоты волн низких резонансных частот. Характеристики низкочастотных колебаний волн могут быть получены непосредственно у причалов, а это дает возможность полноценно рассмотреть тягун как резонанс волн с пришвартованным судном.

Литература

1. СП 38.13330.2012 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*. М.: Минрегион России, 2011. 116 с.
2. Rabinovich A.B. Seiches and Harbor Oscillations. In Handbook of Coastal and Ocean Engineering (edited by Y.C. Kim), Chapter 9, World Scientific Publ., Singapoure, 2009. Pp. 193–236.
3. Miles J.W. Harbor seiching // Annual Review of Fluid Mechanics. 1974. No. 6. Pp. 17–33.
4. Ефимов В.В. [и др.] Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.
5. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 322 с.

Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Сорокин М.В., Поляков А.И. Резонансные характеристики акваторий морских портов

6. Шахин В.М., Шахина Т.В., Тлявлиня Г.В. Резонанс инфрагравитационных волн в огражденных акваториях // Проблемы устойчивого развития регионов юга России. Сочи: СНИЦ РАН, 2004. С. 208–214.
7. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. 174 с.
8. Kofoed-Hansen H. [et al.] Combined numerical and physical modeling of seiching in exposed new marina // Proc. 27th International of Coastal Engineering. 2000. Pp. 3600–3614.
9. Галенин Б.Г. [и др.] Ветер, волны и морские порты. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
10. Gierlevsen T., Hebsgaard M., Kirkegaard J. Wave disturbance modeling in Port of Sines, Portugal – with special emphasis on long period oscillations // Proc. International Conference on Port and Maritime R & D and Technology. 2001. Pp. 337–344.
11. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 446 с.
12. Platzman G.W. Two-dimensional free oscillations in natural basins // J. Phys. Oceanogr. 1972. No. 2(2). Pp. 117–138.
13. Lee J.J. Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry // J. Fluid Mech. 1971. No. 45. Pp. 375–394.
14. Xing X. Computer modeling for wave oscillation problems in harbors and coastal regions. A dissertation presented to the faculty of the graduate school University of Southern California. USA. 2009.
15. Лоскутов А.В. Исследование пространственной структуры собственных колебаний в бухтах Крабовая и Хромова о. Шикотан // Мореходство и морские науки – 2009. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2010. С. 161–166.
16. Шлыгин И.А. Популярная гидрометеорология и судовождение. М.: Транспорт, 1987. 192 с.
17. Тлявлиня Г.В. Влияние компоновки и типа оградительных сооружений на резонанс инфрагравитационных волн в портовых акваториях. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МГСУ. 2006. 128 с.
18. Математическое и физическое моделирование волновых процессов для обеспечения дополнительного обоснования и уточнения проектной документации на строительство объекта «Создание сухогрузного района морского порта Тамань». М.: ОАО «Технопарк МГСУ», 2014. 36 с.
19. Математическое и физическое моделирование волнового режима на подходе к сооружениям порта и взаимодействия волн с оградительными сооружениями порта (остаточное волнение на акватории порта). Расчеты резонансных колебаний в акватории порта. М.: ОАО «Технопарк МГСУ», 2014. 229 с.
20. РД 31.33.02-81 «Методические указания по определению ветровых и волновых условий при проектировании морских портов». М.: СоюзморНИИпроект. 1981. 91 с.
21. Райхлен Ф. Резонанс гавани / Пер.с англ. В кн.: Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. Л.: Гидрометеиздат, 1970. С. 114–166.
22. Holthuijsen L. [et al.] SWAN Cycle III version 40.51. User Manual. The Netherlands. 2009. 67 p.
23. Hasselmann K. [et al.] Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsch. Hydrogr. Institut. Hamburg. 1973. 95 p.
24. Kantardgi I., Zheleznyak M., Demchenko R., Dykyi P., Kivva S., Kolomiets P., Sorokin M. Modeling of Nonlinear Hydrodynamics of the Coastal Areas of the Black Sea by the Chain of the Proprietary and Open Source Models // Proc. EGU 2014. Vienna, 2014. May. 11319 p.
25. Smit P., Stelling G., Zijlema M. Assessment of non-hydrostatic wave-flow model SWASH for directionally spread waves propagating through a barred basin // ACOMEN 2011. 2011. Pp. 1–10.
26. Горюнов А.Ф. Уравнения математической физики в примерах и задачах. М.: МИФИ, 2008. 616 с.
27. Железняк М.К., Пелиновский Е.Н. Физико-математические модели наката цунами на берег // Накат цунами на берег. Сб. науч. тр. Горький: Институт прикладной физики АН СССР, 1985. С. 8-34.
28. Rijnsdorp D.P., Smit P.B., Zijlema M. Non-hydrostatic modelling of infragravity waves using SWASH // Proc. 33rd Conference on Coastal Engineering. 2012. Pp. 1287–1299.
29. Zijlema M., Stelling G., Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters // Coastal Engineering. 2011. 58(10). Pp. 992–1012.

30. Железняк М., Демченко Р., Дикий П., Сорокин М. Численное моделирование резонансных свойств гаваней с помощью нелинейной негидростатической модели SWASH // Математические машины и системы. 2014. №3. С. 78–87.
31. Создание сухогрузного района морского порта Тамань. Проектная документация. Л.: ОАО «ЛенМорНИИПроект», 2013.
32. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Куклев С.В. Параметры ветрового волнения на защищенных акваториях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. №4(10). С. 5–16.
33. Комплекс береговой и морской инфраструктуры в морском порту Геленджик. Проектная документация. Л.: ОАО «ЛенморНИИПроект», 2013.

*Марк Иосифович Железняк, г. Фукусима, Япония
+818058441091; эл. почта: zheleznyak.m@gmail.com*

*Измаил Григорьевич Кантаржи, Москва, Россия
+7(903)5337830; эл. почта: kantardgi@yandex.ru*

*Максим Викторович Сорокин, Киев, Украина
+38(067)5034619; эл. почта: maxim.sorockin@gmail.com*

*Алексей Игоревич Поляков, Москва, Россия
+7(926)1171550; эл. почта: ap.gts@yandex.ru*

© Железняк М.И., Кантаржи И.Г., Сорокин М.В., Поляков А.И., 2015

doi: 10.5862/MCE.57.1

Resonance properties of seaport water areas

M.J. Zheleznyak,

Institute Environmental Radioactivity, Fukushima University
+818058441091; e-mail: zheleznyak.m@gmail.com

I.G. Kantardgi,

Moscow State Civil Engineering University
+7(903)5337830; e-mail: kantardgi@yandex.ru

M.S. Sorokin,

Institute of Mathematical Machine and System Problems
+38(067)5034619; e-mail: maxim.sorockin@gmail.com

A.I. Polyakov,

Moscow State Civil Engineering University
+7(926)1171550; e-mail: ap.gts@yandex.ru

Key words

seaport; port water areas; low frequency oscillations; resonance properties; harbor oscillations

Abstract

The article discusses the modern methods of determining the mode of low-frequency oscillations in a port causing harbor oscillations, using as an example the dry cargo area of the Taman seaport and the Gelendzhik seaport that are currently under design. These ports were scanned for risk of harbor oscillation occurrence through an existing regulatory procedure which uses significant simplifications.

In order to obtain the resonance characteristics of the port areas, low-frequency wave processes in the port were calculated using the SWASH spectral model. As a result, the resonance properties of various port areas important for port design have been obtained. In this case, white noise was modeled at port entrance, and the gains of the spectral components at critical frequencies were found.

It has been shown that the suggested approach allows to obtain the resonance frequencies of the designed harbor. Further development of this approach may result in obtaining the resonance energies as well.

References

1. SP 38.13330.2012 «Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (volnovyye, ledovyye i ot sudov)». Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 2.06.04-82* [SP 38.13330.2012 «Loads and actions on hydrotechnical facilities (wave, ice and from water crafts)» Actualized edition SNIIP 2.06.04-82*]. Moscow: Minregion Rossii. 2011. 116 p. (rus)
2. Rabinovich A.B. Seiches and Harbor Oscillations. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. 2009. Pp. 193–236.
3. Miles J.W. Harbor seiching. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1974. No. 6. Pp. 17–33.
4. Yefimov V.V. i dr. *Volny v pogrannichnykh oblastiakh okeana [Waves in frontier areas of ocean]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1985. 280 p. (rus)
5. Rabinovich A.B. *Dlinnyye gravitatsionnyye volny v okeane: zakhvat, rezonans, izlucheniye* [Long gravitational waves in ocean: capture, resonance, radiation]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1993. 322 p. (rus)
6. Shakhin V.M., Shakhina T.V., Tlyavlina G.V. Rezonans infragravitatsionnykh voln v ograzhdennykh akvatoriyakh [Resonance of infragravitational waves in protected water areas]. *Problemy ustoychivogo razvitiya regionov yuga Rossii*. Sochi: CNITs RAN. 2004. Pp. 208–214. (rus)
7. Dotsenko S.F., Ivanov V.A. *Prirodnyye katastrofy Azovo-Chernomorskogo regiona* [Natural catastrophes in Azov-Black Sea region]. Sevastopol: MGI NAN Ukrainy. 2010. 174 p. (rus)
8. Kofoed-Hansen H. et al. Combined numerical and physical modeling of seiching in exposed new marina. *Proc. 27th International of Coastal Engineering*. 2000. Pp. 3600–3614.
9. Galenin B.G. i dr. *Veter, volny i morskkiye porty* [Wind, waves and seaports]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1986. 264 p. (rus)
10. Gierlevsen T., Hebsgaard M. and Kirkegaard J. Wave disturbance modeling in Port of Sines, Portugal – with special emphasis on long period oscillations. *Proc. International Conference on Port and Maritime R&D and Technology*. 2001. Pp. 337–344.

11. Murti T.S. *Seismicheskiye morskoye volny tsunami* [Seismic sea waves tsunami]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1981. 446 p. (rus)
12. Platzman G.W. Two-dimensional free oscillations in natural basins. *J. Phys. Oceanogr.* 1972. No. 2(2). Pp. 117–138.
13. Lee J.J. Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry. *J. Fluid Mech.* 1971. No. 45. Pp. 375–394.
14. Xing X. *Computer modeling for wave oscillation problems in harbors and coastal regions*. A dissertation presented to the faculty of the graduate school University of Southern California. USA. 2009.
15. Loskutov A.V. Issledovaniye prostranstvennoy struktury sobstvennykh kolebaniy v bukhtakh Krabovaya i Khromova o. Shikotan [Study of self-vibrations spatial structure in bays Krabovaya and Khromova, o. Shikotan]. *Navigation and Maritime Sciences*. 2009. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN. 2010. Pp. 161–166. (rus)
16. Shlygin I.A. *Populyarnaya gidrometeorologiya i sudovozhdeniye* [Popular hydrometeorology and shipbuilding]. Moscow: Transport. 1987. 192 p. (rus)
17. Tlyavlina G.V. *Vliyaniye komponovki i tipa ograditelnykh sooruzheniy na rezonans infragravitatsionnykh voln v portovykh akvatoriakh*. [Influence of arrangement and type of port protecting structures on resonance of infragravitational waves in port's waters]. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Moscow: MGSU. 2006. 128 p. (rus)
18. *Matematicheskoye i fizicheskoye modelirovaniye volnovykh protsessov dlya obespecheniya dopolnitelnogo obosnovaniya i utochneniya proyektnoy dokumentatsii na stroitelstvo obyekta «Sozdaniye sukhogruznogo rayona morskogo porta Taman»* [Mathematical and physical simulation of wave processes for guaranteeing supplementary basis and elaboration of project documentation on construction of entity «Creation of cargo district of the seaport “Taman” »]. Moscow: OAO «Tekhnopark MGSU». 2014. 36 p. (rus)
19. *Matematicheskoye i fizicheskoye modelirovaniye volnovogo rezhima na podkhode k sooruzheniyam porta i vzaimodeystviya voln s ograditelnyimi sooruzheniyami porta (ostatochnoye volneniye na akvatorii porta). Raschety rezonansnykh kolebaniy v akvatorii porta* [Mathematical and physical simulation of wave regime on approach to port buildings and interaction between waves and port protecting structures (The residual surface roughness on the port's waters)]. Moscow: OAO «Tekhnopark MGSU». 2014. 229 p. (rus)
20. RD 31.33.02-81 «Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu vetrovykh i volnovykh usloviy pri proyektirovaniy morskikh portov» [Methodological instructions for determination of wind and wave conditions during seaport design]. Moscow: SoyuzmorNIIproyekt. 1981. 91 p. (rus)
21. Raykhlen F. Rezonans gavani. *Gidrodinamika beregovoy zony i estuariyev* [Hydrodynamics of shore and estuary]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1970. Pp. 114–166. (rus)
22. Holthuijsen L. et al. *SWAN Cycle III version 40.51. User Manual*. The Netherlands. 2009. 67 p.
23. Hasselmann K. et al. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsch. Hydrogr. Institut. Hamburg. 1973. 95 p.
24. Kantardgi, M. Zheleznyak., R. Demchenko, Dyki P., Kivva S., Kolomiets P., Sorokin M. Modeling of Nonlinear Hydrodynamics of the Coastal Areas of the Black Sea by the Chain of the Proprietary and Open Source Models. *Proc. EGU 2014*. Vienna. 2014. Pp. 113–119.
25. Smit P., Stelling G. and Zijlema M. Assessment of non-hydrostatic wave-flow model SWASH for directionally spread waves propagating through a barred basin. *ACOMEN 2011*. 2011. Pp. 1–10.
26. Goryunov A.F. *Uravneniya matematicheskoy fiziki v primerakh i zadachakh* [Mathematical physics equations with praxis]. Moscow: MIFI. 2008. 616 p. (rus)
27. Zheleznyak M.K., Pelinovskiy Ye.N. Fiziko-matematicheskoye modeli nakata tsunami na bereg. [Physico-mathematical models of tsunami runup]. *Nakat tsunami na bereg. Sbornik nauchnykh trudov* Gorkiy: Institut prikladnoy fiziki AN SSSR. 1985. Pp. 8–34. (rus)
28. Rijnsdorp D. P., Smit P. B. and Zijlema M. Non-hydrostatic modelling of infragravity waves using SWASH. *Proc. 33rd Conference on Coastal Engineering*. 2012. Pp. 1287–1299.
29. Zijlema, M., Stelling, G., and Smit, P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*. 2011. No. 58(10). Pp. 992–1012.
30. Zheleznyak M., Demchenko R., Dikiy P., Sorokin M. Chislennoye modelirovaniye rezonansnykh svoystv gavaney s pomoshchyu nelineynoy negidrostaticheskoy modeli SWASH [Numerical simulation of resonance properties of harbours using nonlinear non-hydraulic model SWASH]. *Matematicheskoye mashiny i sistemy*. 2014. No. 3. Pp. 78–87. (rus)
31. Sozdaniye sukhogruznogo rayona morskogo porta Taman. *Proyektynaya dokumentatsiya* [Creation of cargo district of the seaport «Taman». Project documentation]. Leningrad: OAO «LenMorNIIProyekt». 2013. (rus)

32. Divinskiy B.V., Kosyan R.D., Kuklev S.V. Parametry vetrovogo volneniya na zashchishchennykh akvatoriyyakh [Parameters of wind surface roughness in protected water areas]. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2010. No. 4(10). Pp.5–16 (rus)
33. Kompleks beregovoy i morskoy infrastruktury v morskoye portu Gelendzhik. Proyektynaya dokumentatsiya [Complex of coast and marine infrastructure of the seaport Gelendzhik. Project documentation.]. Leningrad: OAO «LenmorNIIproyekt». 2013. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 3–19