

УДК 551.4.681

## УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УЩЕРБА ОТ ШТОРМОВ

А. А. ЗАГОРОДНИКОВ

*Национальный НИЦ оборонных технологий и военной безопасности Украины, Киев*

*Получено 29.03.2006*

Рассмотрено влияние естественных или искусственных неоднородностей рельефа дна на условия распространения ветровых волн, их фокусировку, дефокусировку и изменения направления. По аналогии с оптическими элементами они названы морскими призмами и линзами. Показано практическое значение возможности управления волновыми потоками. Даны рекомендации о повышении штормостойчивости морских платформ.

Розглянуто вплив природних або штучних неоднорідностей рельєфу дна на умови поширення вітрових хвиль, їхнє фокусування, дефокусування й зміни напрямку. За аналогією з оптичними елементами вони названі морськими призмами й лінзами. Показано практичне значення можливості керування хвильовими потоками. Дано рекомендації про підвищення штормостійкості морських платформ.

Influence natural or artificial heterogeneity of a relief of a bottom on conditions of distribution of wind waves, their focusing, defocusing and changes of a direction is considered. By analogy to optical elements they are named by sea prisms and lenses. Practical value of an opportunity of management is shown by wave streams. Recommendations for increase of stability of sea platforms by storm are given.

### ВВЕДЕНИЕ

Прибрежная зона океанов и морей играет особую роль в жизни человечества. На побережье находится большинство крупных городов мира. Доля добычи полезных ископаемых на море, в том числе и углеводородного сырья, непрерывно растет. В Украине наиболее богатые запасы углеводородного сырья находятся в Азовском море и на шельфе Черного моря. Из-за чрезмерного воздействия человека на природу начал изменяться климат, что стало проявляться в увеличении количества и интенсивности опасных погодных явлений, в том числе ураганов и штормов. Растут материальные и человеческие жертвы от них. Например, в ноябре 1970 г. в Бангладеш от затопления побережья штормовыми волнами погибло 300 тыс. человек, в 1978 г. на побережье Бенгальского залива в Индии – 200 тыс. человек, в октябре 1981 г. в Индокитае – 300 тыс. человек. Серия ураганов в 2005 году в США нанесла ущерб в 100 млрд. долларов. Из 12 тыс. нефтегазодобывающих морских платформ во всем мире на 4 тыс. были серьезные аварии и даже катастрофы из-за штормов.

Особую опасность представляют сверхвысокие волны. 27.03.1980 г. в Северном море волной более 20 м была разрушена платформа “Александр Кьелан”, погибло 123 человека, убытки оценены более 1 млрд. долларов. В этом же море наблюдалась волна [1] высотой более 26 м. В Азово-

Черноморском бассейне сильные штормы бывают реже, чем в Атлантике, но и здесь наблюдаются сверхвысокие волны. Например, в ноябре 1980 г. волна высотой в 22 м разрушила морскую платформу в районе мыса Тарханкут. Штормовые волны разрушают порты, морские сооружения, молы, берега и пляжи. Украина ежегодно теряет более 50 га прибрежной земли из-за размыва волнами.

Для выработки рекомендаций по снижению ущерба от штормов в прибрежной зоне, необходимо рассмотреть особенности поля волнения, которые здесь имеют место. Глубина моря по мере приближения к берегу не всегда убывает плавно и равномерно. Имеют место подводные холмы, впадины, долины и другие неоднородности рельефа дна. Они влияют не только на рефракцию, но и фокусировку ветровых волн и даже на изменение направления движения. Ниже рассмотрены некоторые элементы подводного рельефа естественного и искусственного происхождения, которые могут быть использованы для управления потоками ветровых волн с целью снижения ущерба от штормов.

При косом падении к изобатам (линиям равных глубин) фронт волны и направление волнового луча изменяются. Происходит рефракция ветровых волн, т. е. искривление волнового луча. При наличии сложных форм подводного рельефа в прибрежной зоне происходит не только рефракция, но и фокусировка и дефокусировка волн.

В областях сходимости волновых лучей уровень волновой энергии повышается. От берега волны так же отражаются. Интерференция падающего и отраженного поля усложняют волновую картину. Иногда имеют место и дифракционные волны, которые вносят дополнительный вклад в суммарное поле. В данной статье рассмотрена рефракция, фокусировка и дефокусировка ветровых волн.

## 1. РЕФРАКЦИЯ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Расчет рефракции оптических волн в атмосфере впервые в конце XVIII века выполнил И. Ньютон. Оставшиеся его записи были настолько краткими, что метод не был понят. Только в 1934 г. академик А. Н. Крылов [2] сумел его расшифровать и развить далее. В 1935 г. академик В. В. Шулейкин [3] применил закономерности рефракции оптических волн к рефракции ветровых волн в прибрежной зоне. Через некоторое время новые работы по рефракции ветровых волн появились в СССР и за рубежом [4–6 и др.]. Особо следует отметить работу [6]. В ней разработана методика численного расчета рефракции поверхностных гравитационных волн, реализуемая на ЭВМ, позволяющая строить и анализировать распределение волновых фронтов, лучей и высот при выходе волн с глубиной воды на мелководье. Расчеты основаны на лучевом методе и осуществляются как при аналитическом, так и табличном задании поверхности дна. Известный океанолог СССР Ю.М. Крылов [4] упростил метод В.В. Шулейкина. Ниже изложены предложения по управлению волновыми потоками, основой которых являются работы А.Н. Крылова [2], В.В. Шулейкина [3] и Ю.М. Крылова [4], поскольку они обладают наглядностью для предварительных оценочных расчетов.

В оптике рефракцией называется искривление оптического луча при переходе из одной среды в другую с отличающейся оптической плотностью. Например, если луч света при наклонном падении к поверхности раздела воздух-вода далее проходит в воду, то он отклоняется в сторону нормали к поверхности раздела. В результате оказывается, что угол преломления меньше угла падения. Вода, по сравнению с воздухом, имеет большую оптическую плотность и скорость распространения света в ней меньше, чем скорость распространения в воздухе.

Ниже будет показано, что скорость распространения ветровых волн зависит от глубины водоема [7].

На рис. 1 линия AA разделяет водоем на две

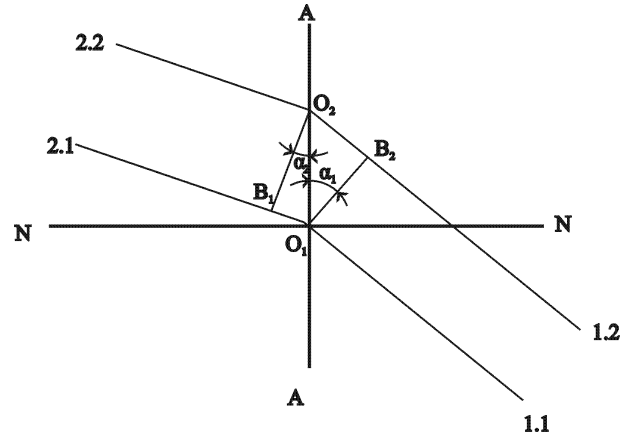


Рис. 1. Траектории лучей ветровых волн при переходе двух участков водоема с разными глубинами

части. В правой части глубина больше и скорость распространения  $c_1$  так же больше, чем в левой части  $c_2$ , т. е. выполняется

$$h_1 > h_2; \quad c_1 > c_2. \quad (1)$$

На плоскость раздела под углом  $\alpha_1$  падает фронт ветровой волны: два параллельных луча 1.1. и 1.2. показаны на схеме рис. 1. Луч 1.1. первым достигает плоскости раздела и далее распространяется в среде 2, в которой скорость распространения  $c_2$  меньше, чем в первой области. Пока луч 1.2 пройдет путь  $B_2O_2$  и достигнет плоскости раздела A–A, луч 1.1 за этот же промежуток времени пройдет расстояние  $O_1B_1$ . Из геометрических соображений вытекает

$$O_1B_1 = c_2\Delta t, \quad O_2B_2 = c_1\Delta t, \quad (2)$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{O_2B_2}{O_1B_1} = \frac{c_1\Delta t}{O_1O_2},$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{O_2B_2}{O_1B_2} = \frac{c_2\Delta t}{O_1O_2},$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}. \quad (3)$$

Таким образом, при переходе ветровой волны в область, где скорость распространения меньше, волновой луч отклоняется в сторону нормали NN и угол преломления  $\alpha_2$  оказывается меньшим, чем угол падения  $\alpha_1$ .

Для большей наглядности на рис. 2 схематически изображен профиль дна водоема с двумя разными глубинами  $h_1$  и  $h_2$ , линией раздела A–A.

Профиль дна с плавно уменьшающейся глубиной по направлению к берегу (рис. 3) можно представить в виде множества бесконечно малых ступенек. При косом падении ветровой волны к берегу

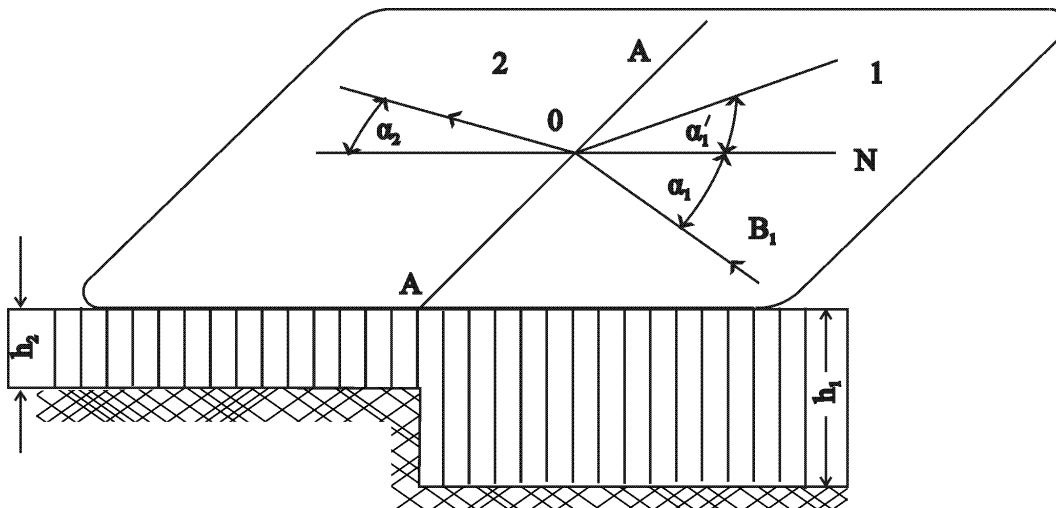


Рис. 2. Схема профиля глубины водоема со ступенчатым изменением дна

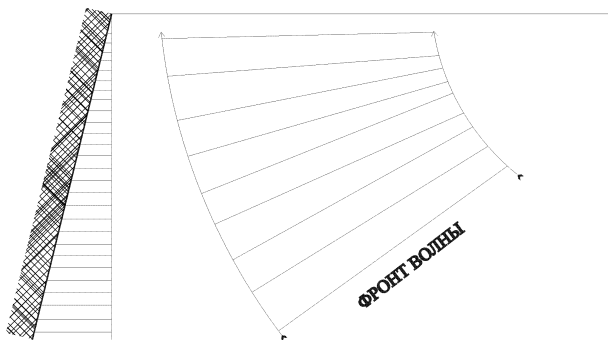


Рис. 3. Рефракция морской волны при подходе к берегу водоема с пологим дном

волновой луч при переходе от одной ступеньки к другой будет непрерывно приближаться к нормали, проведенной к линии берега, а фронт волны постепенно становится параллельным берегу.

Рассмотрим распространение ветровой волны при произвольном рельефе дна. В большинстве случаев крутизна дна сравнительно невелика и дифракцией волн можно пренебречь, а зависимость скорости распространения ветровых волн при постоянной глубине использовать [4] для каждой фиксированной глубины. В соответствии с формулой Лапласа параметры ветровой волны и глубины водоема  $h$  связаны [7] соотношением:

$$\mu^2 = gk(thkh). \quad (4)$$

Здесь:  $\mu = 2\pi/T$  – круговая частота;  $T$  – период волны;  $k = 2\pi/\Lambda$  – волновое число;  $\Lambda$  – длина волны.

Учитывая зависимость  $c = \Lambda/T$  и соотношение

(4), скорость ветровой волны в водоеме с конечной глубиной будет

$$c^2 = \frac{g\Lambda}{2\pi} \text{th } 2\pi h/\Lambda. \quad (5)$$

При глубине водоема больше половины длины волны зависимости (4) и (5) упрощаются:

$$h \geq \frac{\Lambda}{2}; \quad \text{th } kh \approx 1; \quad \mu^2 = gk; \quad c^2 = \frac{g\Lambda}{2\pi}. \quad (6)$$

Глубину  $h = \Lambda/2$  уже можно считать бесконечно большой, так как при глубинах больше половины ветровой волны ее скорость не изменяется. Поскольку период волны  $T$  в процессе распространения не зависит от глубины, то на “глубокой” воде и длина волны остается постоянной. Обозначим скорость и длину волны на “глубокой” воде через  $c_0$  и  $\Lambda_0$ , введем нормированные значения глубины водоема, скорости, и длины волн для глубин  $h < \Lambda/2$ . Откуда имеем

$$C = \frac{c}{c_0}; \quad L = \frac{\Lambda}{\Lambda_0}; \quad H = \frac{h}{\Lambda_0}; \quad c_0^2 = \frac{g\Lambda_0}{2\pi}. \quad (7)$$

Из-за независимости периода волны от глубины выполняются соотношения:

$$T(h) = \text{const}; \quad \frac{c}{c_0} = \frac{\Lambda}{\Lambda_0}; \quad C = L. \quad (8)$$

Разделив выражение (5) на последнее равенство (7) и используя нормированные параметры волны, получим зависимости:

$$\frac{c^2}{C_0^2} = \frac{\Lambda}{\Lambda_0} \text{th} \left( \frac{2\pi h \Lambda_0}{\Lambda_0 \Lambda} \right),$$

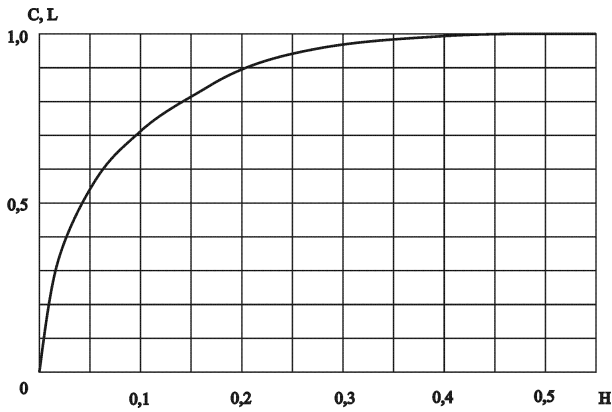


Рис. 4. Зависимость безразмерных скорости  $C = c/c_0$  и длины волны  $L = \Lambda/\Lambda_0$  от безразмерной глубины  $H = h/\Lambda_0$

$$\frac{c}{c_0} = \text{th} \left( 2\pi \frac{h}{\Lambda_0} \cdot \frac{c_0}{c} \right), \quad (9)$$

$$C = \text{th} \frac{2\pi H}{C}.$$

Из последней формулы (9) вытекают соотношения:

$$\text{arch} C = \frac{2\pi H}{C}, \quad (10)$$

$$H = \frac{C}{2\pi} \text{arch} C = \frac{C}{2\pi} \ln \frac{1+C}{1-C}.$$

Нормированные значения скорости и длины волны изменяются в пределах  $[1-0]$ , когда истинная глубина водоема изменяется в пределах  $[1-0]$ . В действительности если глубина  $h \geq \Lambda/2$ , то ее уже можно считать бесконечной.

Траектория волны в прибрежной зоне, т. е. рефракция, определяется следующим образом. Строится график нормированной скорости  $C = C(H)$  для значений  $1 \geq C \geq 0$  в диапазоне нормированных глубин  $1 \geq H \geq 0$ , который приведен на рис. 4. Как следует из графика, реально  $C \rightarrow 1$  уже при  $H \geq 0.5$ .

Предположим, что волновой луч (рис. 5) направлен к нормали, проведенной в точке  $A_0$  к изобате  $H_0 = 0.5$  под углом  $\alpha_0 \neq 0$ . Т. е. имеет место косое падение волны. На небольшом расстоянии от изобаты  $H_0 = 0.5$  возьмем изобату  $H_1 < 0.5$ . По аналогии с формулой (3) выполняется соотношение

$$\sin \alpha_1 / \sin \alpha_0 = c/c_0 = C_1 = L_1, \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \arcsin (C_1 \sin \alpha_0). \quad (12)$$

Значение нормированной скорости  $C_1$  находится из графика рис. 4. По формуле (12) определяется

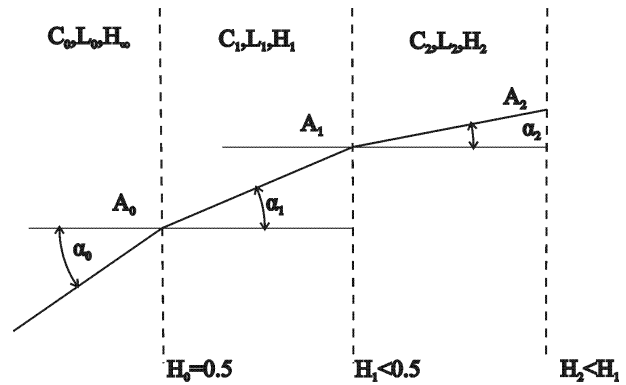


Рис. 5. Схема для вычисления рефракции ветровой волны на мелководье

угол  $\alpha_1$  и проводится прямая от точки  $A_0$  к точке  $A_1$ .

Далее выбирается следующая изобата  $H_2 < H_1$  на небольшом удалении от последней. По глубине  $H_2$  и графику рис. 4 определяется нормированная скорость  $C_2$ , а по ней и формуле (11) находится угол  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \arcsin (C_2 \sin \alpha_1). \quad (13)$$

Из точки  $A_1$  под углом  $\alpha_2$  проводится отрезок  $A_1A_2$ . И так последовательно строится траектория волнового луча.

В большинстве случаев изобаты не параллельны друг другу. Тогда на “глубокой” воде под углом  $\alpha_0$  (направлением вектора скорости ветровой волны к изобате) проводится несколько параллельных лучей и для каждого из них находится траектория. При наличии в подводном рельефе особенностей, таких как подводные холмы, впадины, ложбины и другие, волновые лучи могут на “мелкой” воде сходиться и расходиться, хотя на “глубокой” воде они были параллельны. В случае сходимости, т. е. фокусировки волновых лучей, в этой области возрастают высоты ветровых волн, что увеличивает опасность для судов и сооружений на море.

## 2. РЕФРАКЦИЯ И ФОКУСИРОВКА ОГИБАЮЩЕЙ ПАКЕТОВ ВОЛН

Явление фокусировки волн известно давно и глубина при сооружении платформы на море выбиралась такой, чтобы для самых длинных волн отсутствовало явление фокусировки, т. е. водоем был “глубоким”. Тем не менее, многие платформы были разрушены особо высокими волнами, которые в окружающей акватории не наблюдались. В работе [8] приведены экспериментальные резуль-

таты, в которых установлены волновые свойства огибающей пакета волн. Огибающая испытывает рефракцию независимо от индивидуальных волн, входящих в пакет. Поскольку длина волны огибающей пакета существенно больше, чем длина индивидуальных волн, то она первая испытывает торможение дна, так как водоем является “глубоким” только для индивидуальных волн, а для огибающей он остается “мелким”. Если платформа построена на поднятии дна такой глубины, что является “глубокой” только для индивидуальных волн, то огибающие пакетов могут сфокусироваться на таком поднятии. В этой области образуется зона особо высоких волн, которые могут разрушить платформу.

Указанные волновые свойства огибающей не были обнаружены ранее только потому, что отсутствовала соответствующая измерительная аппаратура. Однако факты проникновения волновых движений на большую глубину, чем половина индивидуальных волн, отмечались и ранее. Например, в работе [9] известный специалист по морфологии берегов В.П. Зенкович отмечал случаи перемещения песчаных наносов на глубине 200 м под влиянием волнения. В этой же работе он приводит факты, взятые из работы [10], о перемещении волнами камней на дне морского водоема глубиной более 200 м.

Только недавно появилась работа [11], объясняющая волновые свойства огибающей пакетов волн. Множество экспериментов, выполненных нами, убедительно показывают, что при подходе волны к берегу в водоеме с уменьшающейся глубиной, векторы фазовой и групповой скоростей все более отличаются и по направлению и по модулю. В соответствии с выводами классической гидромеханики [7] модули фазовой и групповой скоростей должны сближаться. На основании экспериментальных исследований для расчета зависимости групповой скорости от глубины предлагается феноменологическое соотношение:

$$c_g = \frac{c_0}{2} \left( \operatorname{th} \frac{2\pi h}{\Lambda_g} \right)^{1/2}. \quad (14)$$

Параметры огибающей пакетов волн на “глубокой” воде определяются по соответствующим характеристикам индивидуальных волн. Число волн в группе обычно колеблется в пределах  $n = 6 - 10$ . Групповая скорость на глубокой воде в два раза меньше фазовой, а период пакетов (групп) волн в  $n$  раз больше среднего периода индивидуальных волн. Для определенности примем  $n = 8$ . С учетом

этих замечаний искомые параметры равны:

$$c_g = c_0/2; \quad n_\Lambda = n_T/2; \quad (15)$$

$$\Lambda_g = n_T \Lambda / 2 = 4\Lambda; \quad T_g = nT = 8\Lambda,$$

где  $n_\Lambda$  – число индивидуальных волн в группе волн на глубокой воде;  $n_T$  – число индивидуальных временных периодов в группе волн.

То есть, если волнограмма получена 0-сечением замороженного рельефа ветровых волн, то в группе волн будут 4 индивидуальных волны, а в волнограмме, как функции времени, для каждой фиксированной точки будут 8 индивидуальных периодов в одном периоде огибающей пакетов (групп) волн. Определение траектории волнового луча огибающей пакетов волн выполняется сходным образом с расчетом рефракции индивидуальных волн. Выбирается исходная точка  $A_0$  возможно ближе к изобате

$$h = \lambda_{g0}/2 = 2\Lambda_0, \quad (16)$$

где  $\Lambda_{g0}$  – длина группы волн на “глубокой” для огибающей пакетов волн воде.

Проводится следующая изобата  $h_1 < 2\Lambda_0$  на небольшом расстоянии от изобаты  $h = 2\Lambda_0$ . Для глубины  $h_1$  по графику рис. 4 находится нормированное значение групповой скорости  $C_{g1}$  по абсциссе нормированной глубины. Угол  $\alpha_1$  определяется по формуле, аналогичной зависимости (12):

$$\alpha_1 = \arcsin(C_{g1} \sin \alpha_0). \quad (17)$$

От точки  $A_0$  по направлению  $\alpha_1$  проводится прямая до пересечения с изобатой  $h_1$  в точке  $A_1$ . Далее аналогичным образом определяется значение глубины  $h_2$  в точке  $A_2$ , находится  $C_{g2}$ , далее  $\alpha_2$  и строятся отрезки траектории группы волн  $A_0A_1$ ,  $A_1A_2$  и т. д.

В результате строится траектория движения группы волн из отрезков, т. е. в виде ломаной линии. При необходимости эту ломаную можно сгладить и получить плавную траекторию движения групп волн. Для оценки степени сходимости или расходимости волн, т. е. их фокусировки или дефокусировки, вначале строится пучок волновых лучей и находится для каждого из них траектория.

Степень сходимости дает возможность оценить концентрацию волновой энергии в той или иной области водоема. Энергия волнения заключена между соседними траекториями волны, т. е. соседними волновыми лучами огибающей пакетов волн, движущейся с групповой скоростью. Известно, что энергия волнения распространяется [5] с групповой скоростью. Поэтому в тех местах, где



Табл. 1.

|                        |      |      |      |       |
|------------------------|------|------|------|-------|
| $C_2/C_1$              | 0.5  | 0.7  | 0.8  | 0.9   |
| $\beta_{\text{град}}$  | 39.8 | 67   | 86.4 | 112.6 |
| $\delta_{\text{град}}$ | 70.1 | 56.5 | 46.8 | 33.7  |

скоростей  $C_1/C_2$ , при параллельности волновых лучей основанию призмы можно достичь максимального отклонения лучей ветровых волн. Максимальное значение угла преломления  $\alpha_4 = \pi/2$ , поэтому на основании выражений (18) и (19) имеем

$$\sin \alpha_3 = \left(\frac{C_2}{C_1}\right) \sin \frac{\pi}{2} = \left(\frac{C_2}{C_1}\right); \alpha_3 = \arcsin \left(\frac{C_2}{C_1}\right); \quad (22)$$

$$\sin \alpha_2 = \sin \beta - \alpha_3 = \left(\frac{C_2}{C_1}\right) \sin \frac{\beta}{2}. \quad (23)$$

Из уравнения (21) может быть найдено значение угла  $\beta$  при вершине МП для различных значений отношения скоростей волн  $C_2/C_1$ . Максимальное отклонение волнового луча, которое можно добиться при разных значениях  $C_2/C_1$ , как это следует из геометрических построений схемы, приведенной на рис. 6, будет

$$\delta_{max} = \pi/2 - \beta/2. \quad (24)$$

Данные вычислений по формулам (22) и (23) приведены в табл. 1. Из этих данных следует, что отклонение волновых лучей МП возрастает с увеличением ее преломляющих свойств, т. е. уменьшения отношения  $C_2/C_1$ . Это свойство аналогично оптической призме, которая отклоняет световой луч тем больше, чем выше оптическая плотность материала. Ширина фронта  $T_0T_2$  падающих на “призму” ветровых волн больше ширины фронта преломленных лучей  $BP_2$ . Таким образом, “морская призма” может не только изменять направление морских волн, но и концентрировать их, т. е. увеличивать плотность волновой энергии, проходящей на единицу волнового фронта.

Оценку степени концентрации волновой энергии  $\eta$  после прохождения ветровых волн через МП можно получить по отношению ширины фронта  $T_0T_2$  падающих волн на МП к ширине фронта  $BP_2$  преломленных волн:

$$\eta = \frac{T_0T_2}{BP_2} = \frac{T_0C \cos \frac{\beta}{2}}{BC \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_4\right)}. \quad (25)$$

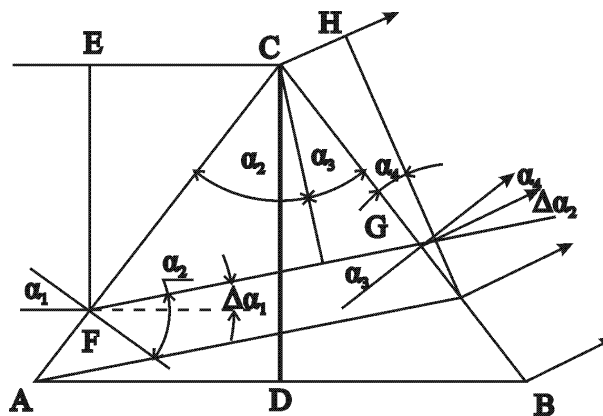


Рис. 7. Схема прохождения ветровых волн через МП в пределах которой скорость волн больше чем вне ее

На основании теоремы синусов получаем:

$$T_0C = \frac{BC \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_3\right)}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right)} = \frac{BC \cos \alpha_3}{\cos \alpha_2}. \quad (26)$$

Подставив выражение (25) в (26), получим искомое соотношение

$$\eta = \frac{\cos \alpha_3 \cdot \cos \frac{\beta}{2}}{\cos \alpha_2 \cdot \cos \alpha_4} = \frac{\cos \frac{\beta}{2} \cdot \cos(\beta - \gamma)}{\cos \gamma \cdot \cos \left\{ \arcsin \left[ \frac{C_1}{C_2} \sin(\beta - \gamma) \right] \right\}}, \quad (27)$$

где

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{C_1}{C_2} \sin \frac{\beta}{2}\right).$$

В соотношении (25) все углы ( $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ) зависят от преломляющих свойств МП, т. е. отношения  $C_2/C_1$  и угла при вершине призмы  $\beta$ . Используя зависимости (17)–(19) и (25), определим значения  $\eta$  для различных отношений  $C_2/C_1$  и углов  $\beta$ . Результаты приведены в таблице 2. Их анализ показывает, что при приближении отклоненного луча к своему предельно возможному значению может быть достигнута высокая концентрация волновой энергии.

Морские призмы могут быть и других видов, помимо той, которая изображена на рис. 6.

Например, на рис. 7 приведена схема прохождения ветровых волн через призму, в пределах которой глубина водоема больше, чем в окружающей ее акватории. Соответственно скорость распространения ветровых волн в пределах МП боль-





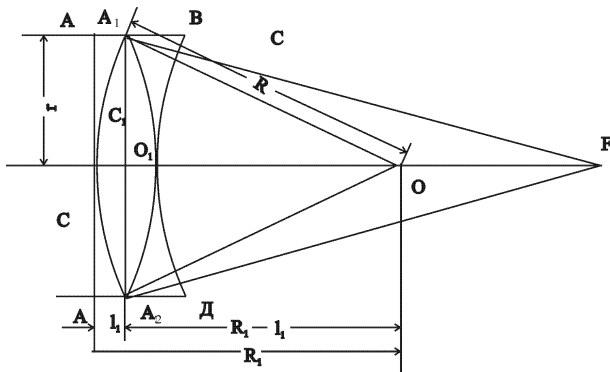


Рис. 9. Схема прохождения волновых лучей через двояковыпуклую линзу со сферическими поверхностями

скую линзу. Так, при прохождении центральным лучом  $O_1O$  всей толщины линзы, самые крайние лучи фронта падающей волны, перпендикулярно линии  $O_1O$ , взятые около точек  $A_1$  и  $A_2$ , пройдут большее расстояние. Путь этих лучей проходит, в основном, в акватории, окружающей линзу, где скорость ветровых волн больше, чем на водной поверхности, расположенной над линзой. Волновой фронт из прямой линии преобразуется в кривую  $ВД$ , соприкасающуюся с центром линзы. Кривая  $ВД$  является частью параболы, [12], если граница МЛ является частью окружности.

Известно, что волновые лучи перпендикулярны линии волнового фронта. Вследствие этого параллельные падающие волновые лучи на МЛ, после выхода из нее, оказываются наклоненными к центральному лучу и сходятся в одну точку  $F$ , лежащую на осевой линии, называемой фокусом. На основании законов оптики [10], используемых для объяснения действия МЛ, радиусы сферических поверхностей линзы  $R_1$  и  $R_2$  и ее фокусное расстояние  $f = O_1F$  связаны соотношением

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot \left( \frac{C_1}{C_2} - 1 \right). \quad (34)$$

Эта зависимость справедлива и для ветровых волн. Через  $C_1$  обозначена скорость ветровых волн в акватории, окружающей МЛ; через  $C_2$  – скорость волн над водной поверхностью в пределах линзы.

В идеальном виде неровности подводного рельефа редко имеют вид тонких линз, для которых справедлива формула (34). Однако приближения к тонким линзам встречаются.

Например, узкий протяженный подводный холм, схема изобат которого изображена на рис. 10, а, выполняет для ветровых волн роль дво-

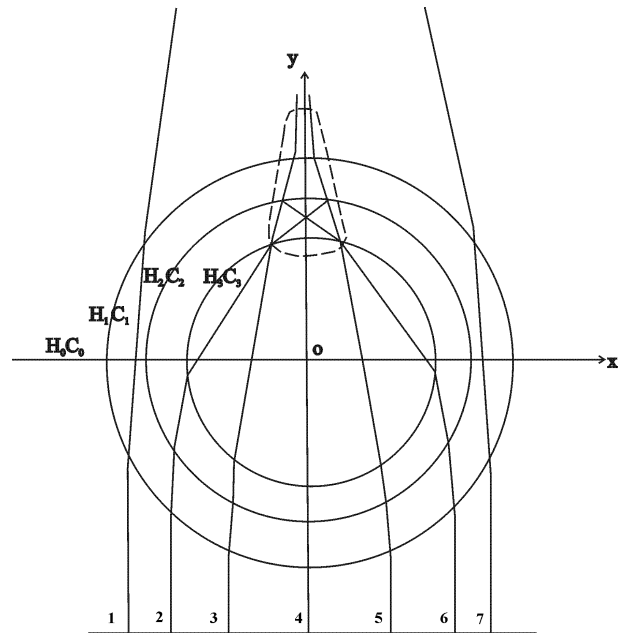


Рис. 11. Схема прохождения ветровых волн через подводный холм круглой формы

яковыпуклой фокусирующей линзы. Семейство изогнутых изобат, выпуклостью направленных в сторону моря (рис.10, б), может сфокусировать ветровые волны как собирающая плоско-выпуклая линза. Этот случай довольно часто имеет место в реальных условиях. В табл. 3 приведены значения фокусного расстояния в долях радиуса кривизны изобаты в зависимости от нормированной скорости  $C = c/c_o$ . Здесь  $c_o$  – скорость волн на глубокой воде,  $c$  – скорость волн в рассматриваемой акватории.

Анализ данных таблицы показывает, что при небольшой кривизне изобат и значениях нормированной скорости ветровых волн, близких к единице, фокусировка происходит на значительном удалении от элементов рельефа, играющих роль линзы. Поскольку энергия собирается с больших площадей акватории, то в районе сходимости ветровых волн образуется зона с особо высокими и неупорядоченными волнами.

Подводные холмы круглой формы так же обладают фокусирующими свойствами, если глубина водоема над ними не является “глубокой” для ветровых волн.

На рис. 11 изображена схема прохождения ветровых волн через акваторию, расположенную над таким подводным холмом. Цифрами 1–7 обозначены волновые лучи. Полагается, что вне пределов холма нормированные глубина и скорость

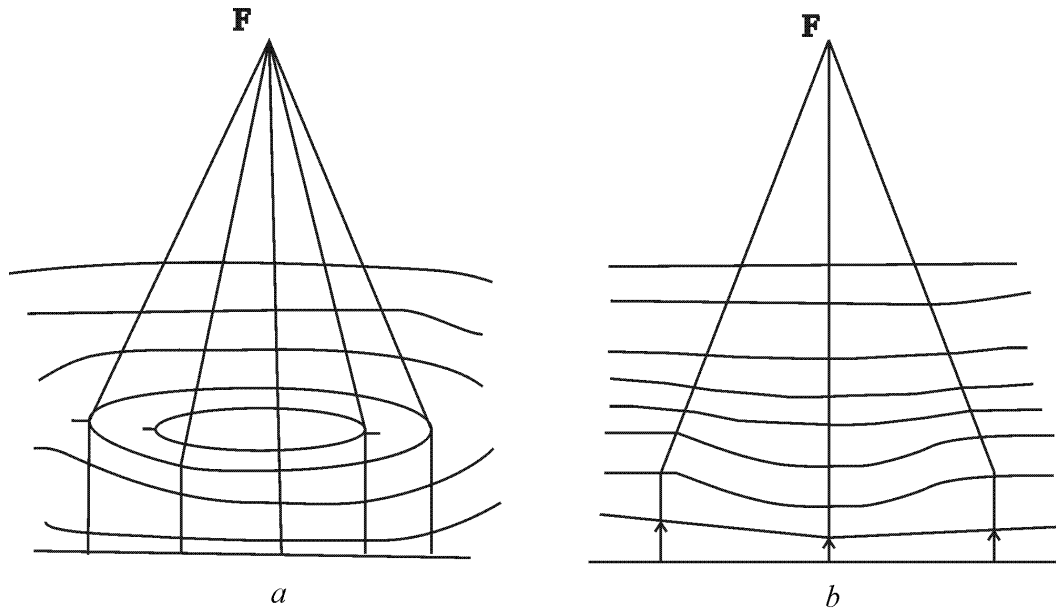


Рис. 10. Схемы прохождения ветровых волн через элементы рельефа дна, имеющих свойства: *a* – двояковыпуклой линзы; *b* – плоско выпуклой линзы

Табл. 3.

|             |          |      |     |      |     |      |      |
|-------------|----------|------|-----|------|-----|------|------|
| $C = c/c_0$ | 1        | 0.95 | 0.9 | 0.85 | 0.8 | 0.75 | 0.7  |
| $f/R$       | $\infty$ | 19   | 9   | 5.7  | 4   | 3.3  | 2.36 |

равны  $H = C = 1$ . Первая внешняя изобата имеет нормированную глубину  $H_1 = 0.3$  и скорость  $C_1 = 0.96$ . Вторая и внутренняя изобаты соответственно имеют значения  $H_2 = 0.2$ ;  $C_2 = 0.88$  и  $H_3 = 0.1$ ;  $C_3 = 0.72$ . Внутренняя часть холма плоская с глубиной  $H = H_3 = 0.1$  и  $C = C_3 = 0.72$ . Для каждого волнового луча просчитано направление движения в виде отрезков ломанной линии, показанной на схеме рис. 11. Из анализа схемы прохождения ветровых волн через водную поверхность, расположенную над подводным холмом круглой формы, следует, что явно выраженного фокуса нет. Однако имеется область, очерченная пунктиром, в которой концентрируются волновые лучи. В этой области существенно больший уровень волновой энергии, чем в окружающей акватории.

На рис. 12 изображено холмообразное поднятие эллипсоидной формы и показан ход волновых лучей при направлении ветровых волн, совпадающем с большой осью эллипса. И здесь, как и над холмом круглой формы, область концентрации волновой энергии находится на периферии холма.

Из рассмотрения фокусирующих свойств подводных холмов круглой или эллипсоидной формы следует, что область концентрации волновой энергии находится на водной поверхности, расположенной над периферией холма. Поэтому морские сооружения, например нефтегазодобывающие платформы, безопаснее строить в центре холмообразного поднятия, а не на периферии, где риск разрушения платформы штормовыми волнами существенно выше.

Впадины, понижения дна также играют роль морских линз, но рассеивающих. Крайне опасно без тщательной проработки проводить выбор грунта вблизи побережья. Коктебель имел один из лучших пляжей в Крыму из мелкой гальки и гравия. На небольшом удалении от берега вскоре после Великой Отечественной войны выбрали значительное количество песка для строительства. Образовались два углубления эллипсоидной формы, которые при волнении играют роль рассеивающих линз (рис. 13). При шторме на берегу между двумя углублениями образовалась зона повышенной энергии волн и пляж стал размываться. Через несколько штормов весь пляж смыло. Со временем

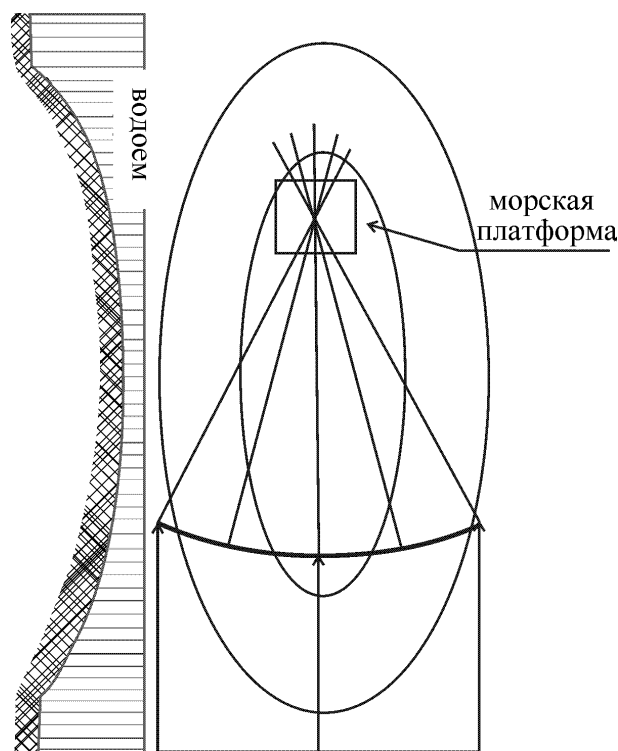


Рис. 12. Штормові волни сфокусувалися в районі платформи, установленної на підводному холмі:

1 – первонаочальний фронт волни; 2 – фронт волни після прохода частини холма

оба углубления были занесены песком и другими материалами, но прекрасный широкий пляж уже исчез. Сейчас создан искусственный пляж из щебня.

В водных массах морской воды с неодинаковыми гидрофизическими и температурными характеристиками или разделенными океаническими фронтами скорости ветровых волн отличаются, хотя и на небольшую величину. Эти различия имеют место также на границе течений, рингов, сильно распресненных вод вблизи устьев рек и морских льдов. В районе фронтов и границ водных масс с различными характеристиками наблюдается рефракция волн, обусловленная разницей скоростей распространения волн. При падении волновых лучей под небольшими углами к оси течения преломленные лучи могут оказаться в пределах течения, которое служит своеобразным волноводом. Течение захватывает ветровые волны и одновременно влияет на изменение характеристик волнения.

Искривления очертания границ разделов играют роль МЛ. В районе этих разделов происходит фокусировка или дефокусировка лучей. В акватории, где произошла фокусировка морских волн,

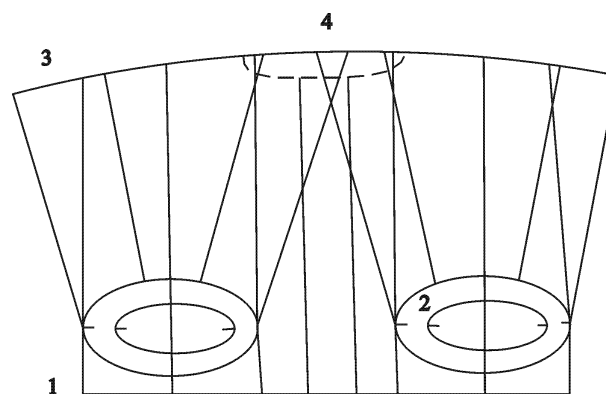


Рис. 13. Схематическое изображение двух впадин около побережья, образованных выемкой подводного грунта, и играющих роль линз:

1 – фронт волн, набегающих на берег; 2 – впадины на дне, образованные выемкой грунта; 3 – береговая черта; 4 – зона пляжа, разрушаемая сфокусированными морскими волнами

возникает область неупорядочного волнения типа “толчей”, но с существенно большими высотами волн. В этих опасных зонах, образующихся в районе океанических неоднородностей, часто гибнут суда.

### 5. УПРАВЛЕНИЕ ВОЛНОВЫМИ ПОТОКАМИ ПОСРЕДСТВОМ ИСКУССТВЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА

Из-за экологического кризиса, в который вступила Земля, растет количество и интенсивность опасных погодных явлений (ОПЯ), в том числе ураганов, штормов и вызванных ими наводнений. По данным ВМО за период 1960-1970 гг. ущерб от ОПЯ составил 50 млрд. долл., а в 1990-2000 гг. он возрос до 300 млрд. долл.. В XXI веке тенденция роста ущерба сохраняется. Необходимо искать действенные методы защиты от штормов. Одним из них является комплекс по управлению волновыми потоками посредством искусственного изменения подводного рельефа. В комплекс входят средства дистанционного мониторинга и измерения характеристик волнения и контроля результатов управления волновыми потоками. Вторым элементом служат конструкции по изменению подводного рельефа. По командам из управляющего центра им придается форма морских линз, призм, волноводов. Эти элементы так воздействуют на падающие на них волны, что волновые потоки или отводятся в сторону от защищаемых объектов, или направляются в приемные бассейны и используются для выработки электроэнергии.

Конструкции искусственных элементов подводного рельефа требуют специального исследования и, безусловно, будут не дешевыми. Однако сопоставление с гибелью сотен тысяч человек и материальных убытков в сотни миллиардов долларов только от одного шторма делает разработку и создание их вполне обоснованным. Управление волновыми потоками может найти широкое применение в ряде других направлений:

- защита берегов, пляжей, морских сооружений от разрушения волнами;
- защита низменных берегов от затоплений во время штормовых нагонов воды;
- расчистка морских каналов занесенных илом и песком;
- получение электричества за счет энергии морских волн;
- сбора больших масс вылитой нефти во время аварий танкеров или подводных трубопроводов;
- промыва загрязненного Балтийского моря (и подобных других водоемов) посредством направления концентрированных волновых потоков из Атлантического океана через балтийские проливы;
- намыва новых пляжей, островов, кос, банок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов для практики и программы дальнейших исследований.

1. При выборе места строительства морских объектов, например платформ для добычи нефти и газа, глубину сооружений следует выбирать с точки зрения оценки возможной фокусировки ветровых волн и исходить не из длины индивидуальной волны, а из длины пакета волн, которая в 4-5 раз больше индивидуальных волн. Например, наибольшая длина морских волн при шторме не превышает  $\Lambda \leq 300$  м. При глубине водоема  $h \geq 0.3\Lambda_{max}$ , т. е. при  $h \geq 90$  м, фокусировка индивидуальных волн не происходит при любом шторме. Для пакетов же волн  $\Lambda_g = 4\Lambda$  эта глубина является “мелкой” и будет происходить фокусировка пакетов волн. Только при  $h \geq 360$  м можно с гарантией, при любом шторме не считаться с явлением фокусировки ветровых волн.

2. Обнаруженные опытным путем волновые свойства пакетов волн до сих пор не подтверждены экспериментально другими исследователями, хотя известных фактов проникновения волновых движений на глубину более 200 м вполне достаточно. Это объясняется отсутствием у других ис-

следователей методики слежения за траекториями волновых лучей. Необходимо повторить эксперименты по рефракции и фокусировке индивидуальных волн и их пакетов с использованием метода, который применялся в работе [8], с учетом результатов работы [6].

3. На холмообразных поднятиях желательно избегать строительства морских платформ. Если такое строительство неизбежно, то сооружать объект необходимо в центре холма, а не на периферии. Риск фокусировки ветровых волн и последующего разрушения платформы на периферии существенно выше.

4. Одной из причин образования сверхвысоких волн является фокусировка ветровых волн из-за наличия в подводном рельефе холмообразных поднятий дна и областей изобат, изогнутых в сторону моря. Холмообразные поднятия играют роль двояковыпуклых собирающих линз, а области с изогнутыми изобатами – роль плосковыгнутых собирающих линз.

5. Наличие сверхвысоких волн при шторме требует строительства платформ не ниже 15 м в Черном море (где наблюдались волны  $h = 22$  м) и не ниже 20 м в Северном и других морях (где наблюдались волны  $h \geq 35$  м).

6. Естественная (образованная структурой подводного рельефа дна) или искусственно созданная морская призма не только отклоняет лучи ветровых волн, но и может осуществлять концентрацию волновой энергии.

7. Физически фокусирующее действие неоднородностей рельефа дна в прибрежной зоне происходит из-за разницы скоростей движения ветровых волн на разных глубинах. Такое же различие скоростей может иметь место и на “глубокой” воде в соприкасающихся между собой участках акватории с различными гидрофизическими характеристиками. Оно наблюдается в районе океанических фронтов, течений, мест соприкосновения пресных и соленых вод и др. Это приводит к фокусировке ветровых волн, появлению сверхвысоких волн и областей с высокими и неупорядоченными волнами типа “толчей”. Области фокусировки ветровых волн представляют крайнюю опасность для судов, эти области необходимо дистанционно определять и избегать попадания в них судов.

1. *Havez S. Andersen O.* Freck wave; rare relaxations of a typical population or typical realisation of rare population. Proc. 10<sup>th</sup> Jnt Offshore and Polar Engineering Conference (May 28 – June 2.2000), Seattle – 2000, – p. 123-130.

2. *Крылов А.Н.* Ньютонова теория астрономической рефракции // Собр. тр.–М.: Изд-во АН СССР.– 1936.– т. 6.– с. 151-226.
3. *Шулейкин В.В.* Рефракция волн на материковой отмели // Изв. АН СССР, Сер. Физика и математика.– 1935.– 10.– С. 1355-1369.
4. *Крылов Ю.М.* К теории рефракции морских волн // Тр. ГОИН.– 1950.– Вып. 16.– С. 95-103.
5. *Arthur R.S., Munk W.H., Isaacs I.D.* The direct construction of wave rays // Trans. Amer. Geophys. Union.– 1952.– Vol. 33, №6.– P. 855-865.
6. *Селезов И.Т., Сидорчук В.Н., Яковлев В.В.* Трансформация волн в прибрежной зоне шельфа.– Киев: Наук. думка, 1983.– 208 с.
7. *Ламб Г.* Гидромеханика.– ОГИЗ: ГИТЛ, 1947.– 928 с.
8. *Глибин Ю.В., Загородников А.А.* Скорости и время существования ветровых волн и их групп // Доповіді НАНУ.– 2000.– №7.– С. 120-127.
9. *Зенкович В.П.* Динамика и морфология морских берегов. ч. 1.– М.-Л.: “Морской транспорт”, 1946.– 496 с.
10. *Cornaglia P.* Sul regime della spriage e sulla regulazione dei Porti, Torino, 1891.
11. *Заславский М.М., Лавренов И.В.* Обобщение управления переноса для спектра волн в горизонтально неоднородных ситуациях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана.– 2005.– Т. 41, N 5.– С. 645-654.
12. *Трофимова Т.И.* Курс Физики.– М.: Высшая школа, 1990.– 490 с.