

А.С. Самодуров, А.В. Носова, А.А. Слепышев

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

### **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОБМЕНА В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ ШЕЛЬФА И СВАЛА ГЛУБИН**

Исследуются особенности трансформации плотности энергии квазиинерционных внутренних волн в зоне сопряжения шельфа и свала глубин на неоднородном стратифицированном течении в лучевом приближении. Показано, что при распространении волн из области открытого моря, в исследуемой области за счет процессов их трансформации в геострофическом течении и отражения от наклонного дна происходит сжатие исходных волновых пучков лучей, что приводит к возрастанию плотности волновой энергии. Возрастание плотности волновой энергии, сопровождающееся уменьшением числа Ричардсона в квазигоризонтальных волновых течениях, должно вызывать, в свою очередь, повышение интенсивности перемешивания и рост коэффициента вертикального турбулентного обмена в таких районах по сравнению с областью открытого моря. Этот вывод согласуется с результатами анализа тонкоструктурных измерений, собранных в ходе натурных экспериментов в соответствующих районах Черного моря.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *квазиинерционные внутренние волны, сдвиговая неустойчивость, вертикальный обмен, диссипация энергии.*

Исследование процессов вертикального обмена в морях и океанах представляет собой одно из ключевых направлений в океанологии. Вертикальный турбулентный обмен играет важную роль в формировании полей температуры, солености и других растворенных химических веществ в водной толще, определяет скорость реакции бассейнов на различные природные и антропогенные воздействия. Многие особенности гидрологической структуры естественных бассейнов могут быть объяснены на основе знания механизмов вертикального обмена, его интенсивности, пространственной и временной изменчивости. В предлагаемой работе основное внимание уделяется выявлению механизмов вертикального обмена в пограничной зоне, разделяющей шельф и свал глубин.

Для выявления особенностей обмена и оценки интенсивности вертикальной турбулентной диффузии необходимо определить, какие физические механизмы вносят определяющий вклад в обмен в исследуемых районах природных водоемов. В работах [1, 2] в рамках решения обратной задачи была разработана одномерная стационарная модель вертикального обмена в Черном море, позволившая предложить практические методы расчета потоков тепла, соли и других растворенных веществ в стратифицированной области бассейна. В этих работах отмечалось, что в деятельном слое Черного моря основная роль в диффузионном вертикальном обмене принадлежит процессам локального обрушения в поле внутренних волн за счет сдвиговой неустойчивости волновых течений.

В обзорной работе [3] на основе анализа результатов исследований, которые посвящены выявлению физических механизмов, ответственных за вертикальную диффузию в стратифицированных бассейнах, делается вывод

© А.С. Самодуров, А.В. Носова, А.А. Слепышев, 2011

о том, что в основной толще устойчиво стратифицированного океана, в удалении от резких фронтальных зон и проливов, а так же районов, в которых созданы условия для проявления механизма двойной диффузии, процессы вертикального перемешивания поддерживаются главным образом за счет энергии опрокидывающихся внутренних волн.

Обратимая тонкая структура гидрофизических полей в стратифицированной жидкости формируется собственно волнами, в то время как микроструктура, отражающая процессы перемешивания, локализуется в турбулентных пятнах, образующихся за счет сдвиговой неустойчивости в поле инерционно-гравитационных внутренних волн. Именно этот механизм при указанных условиях вносит основной вклад в вертикальный турбулентный обмен.

В работах [4, 5] была построена модель климатического спектра внутренних волн в условиях открытого океана, которая адекватно описывает наблюдаемую структуру одномерных спектров в океанском пикноклине. На основе анализа модели климатического спектра внутренних волн установлено, что энергоснабжение турбулентных пятен обеспечивают волны вблизи инерционной частоты, теряющие устойчивость за счет роста амплитуды и уменьшения масштаба с приближением к инерционной частоте. Ранее этот результат был получен в рамках теоретических и численных моделей, которые учитывают нелинейные взаимодействия в волновом поле [6 – 8].

В предлагаемой работе исследуется влияние внешних факторов на возможное увеличение вероятности сдвиговой неустойчивости в поле квазиинерционных внутренних волн, как фактора интенсификации перемешивания и вертикального обмена в переходной зоне между шельфом и свалом глубин в верхнем стратифицированном слое.

**Результаты анализа данных натуральных измерений.** Данная работа является развитием исследований вертикального турбулентного обмена в зоне сопряжения шельфа и свала глубин Черного моря, выполненных на основе анализа данных измерений [9 – 11], полученных с использованием зонда-турбулиметра «Сигма-1» [12].

Натурные данные о тонкой структуре и микроструктуре гидрофизических полей в исследуемой области Черного моря были собраны в трех экспедициях, в районах с близкими физико-географическими условиями. Два массива данных получены в 2004 г. в рамках международных проектов: первый, *UNDP/GEF-BSERP*<sup>1</sup> (май 2004 г.), в северо-западной части моря и второй, «*Black Sea 2004*» (июль 2004 г.), в северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджик. Третья экспедиция проводилась в рамках национальных проектов на судне «Эксперимент» (май 2007 г.). Информация получена с помощью зондирующей системы «Сигма-1» в верхнем стометровом слое океана. В качестве метода обработки данных использовался метод расчета коэффициента вертикальной турбулентной диффузии, в зависимости от внешних условий, предложенный в [5, 13].

На основе спектрального анализа полученного массива данных выявлена эмпирическая зависимость характерного масштаба турбулентных пятен от частоты плавучести:

---

<sup>1</sup> *UNDP/GEF-BSERP* – The United Nations Development Programme/Global Environment Facility-Black Sea Ecosystem Recovery Project.

$$L = DN_c^{-1}. \quad (1)$$

Здесь  $N_c = N(2\pi)^{-1}$  – локальная циклическая частота плавучести,  $D$  – коэффициент пропорциональности, который оценивается на основе анализа данных измерений,  $N = \sqrt{(g/\rho_0)(\partial\rho/\partial z)}$  – частота Брента-Вяйсяля (или частота плавучести),  $\rho$  – среднее распределение плотности жидкости по глубине,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho_0$  – характерная плотность жидкости в слое.

Полученный массив данных  $L(N_c)$  представлен на рис. 1, где также помещена зависимость  $L(N_c)$  для тропической области Индийского океана [5], полученная на основе большого массива экспериментальных данных.

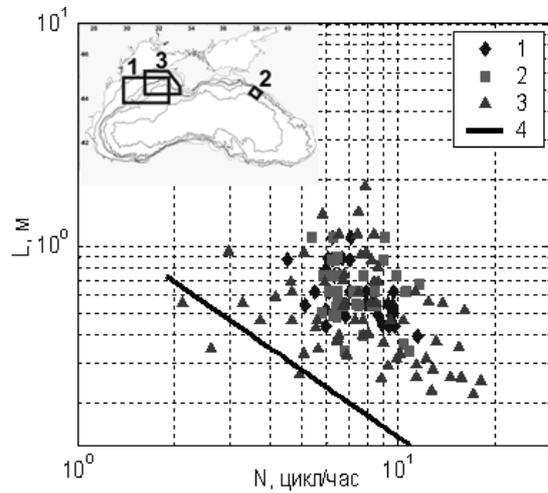


Рис. 1. Экспериментальная зависимость вертикального масштаба турбулентных пятен  $L$  от локальной стратификации  $N_c$  в зоне сопряжения шельфа и континентального склона Черного моря по данным натурных измерений на трех полигонах (расположение полигонов указано на врезке), [11]. Сплошная линия соответствует средней зависимости, полученной по данным измерений в верхнем термоклине глубоководной части Индийского океана [5].

Совместное использование полученного соотношения с аналогичной зависимостью, полученной из энергетических соображений [5], дает возможность получить оценки для коэффициента вертикальной диффузии и скорости диссипации кинетической энергии в верхнем термоклине:

$$k \cong 4,8 \cdot 10^{-5} D^2 N_c^{-1} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad \varepsilon \cong 4,3 \cdot 10^{-10} D^2 N_c \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии;  $\varepsilon$  – скорость диссипации энергии.

Анализ данных показал, что в области свала глубин на северо-западном шельфе Черного моря наблюдается интенсификация процессов перемешивания по сравнению с открытым морем. В частности, было показано, что в области Основного черноморского течения над свалом глубин коэффициент вертикальной турбулентной диффузии и скорость диссипации энергии почти на порядок величины превышают значения этих характеристик для открытого моря при одинаковой стратификации [11]:

$$k \cong 9,4 \cdot 10^{-5} N_c^{-1} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad \varepsilon \cong 8,4 \cdot 10^{-10} N_c \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \text{ для открытого моря}, \quad (3)$$

$$k \cong 8,4 \cdot 10^{-4} N_c^{-1} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad \varepsilon \cong 7,6 \cdot 10^{-9} N_c \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \text{ для исследуемых районов}. \quad (4)$$

**Роль рельефа дна в усилении перемешивания и вертикального обмена.** Учитывая особенности распространения лучей трехмерных внутренних инерционно-гравитационных волн и их отражения от границ [14], рассмотрим возможности трансформации плотности энергии в волновых пучках, порожденных источниками волн, в процессах отражения от наклонных твердых границ.

Выберем для простоты двумерную стратифицированную систему с твердой крышкой на поверхности при условиях постоянства средней частоты плавучести  $N$ , наличия наклонного дна и отсутствия среднего течения. Предположим, что источник низкочастотных (квазиинерционных) волн конечного размера расположен на поверхности в районе открытого моря. От источника в обоих направлениях распространяются волны заданной частоты. Они представляют собой пучки лучей, ограниченного поперечного размера, соответствующего горизонтальному масштабу источника волн (рассматривается распространение лучей «к берегу» – см. рис. 2).

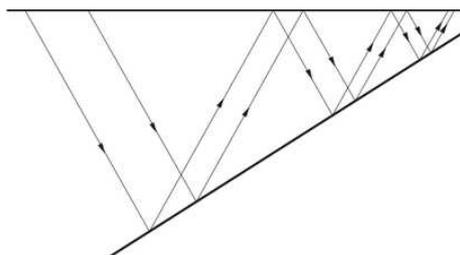


Рис. 2. Схематическое представление трансформации плотности энергии в волновом пучке, порожденном источником квазиинерционных волн, в результате многократного отражения от наклонной границы, при постоянной средней частоте  $N$  и отсутствии среднего течения. Стрелками показано направление групповой скорости.

В соответствии с установленными фактами кинематики волн [14], при отражении луча от наклонной плоскости угол падения равен углу отражения по отношению к воображаемой горизонтальной плоскости, когда луч отражается вперед, или по отношению к воображаемой вертикальной плоскости, когда луч отражается назад. Тогда для выбранного положения источника пучок лучей после отражения от наклонной плоскости вперед или назад сжимается.

Этот ключевой для данного рассмотрения факт означает, что после отражения (а при распространении энергии «к берегу» – после каждого последующего отражения) от наклонной плоскости плотность энергии в пучке возрастает. Таким образом, амплитуда волны в пучке возрастает вместе с уменьшением ее вертикального масштаба, что приводит к повышению вероятности сдвиговой неустойчивости и перемешивания в квазигоризонтальных стратифицированных течениях, формируемых квазиинерционной волной, по критерию  $Ri = N^2/u_z^2 < 0,25$ . Здесь  $u_z$  – производная скорости волнового квазигоризонтального течения по глубине.

Выше была рассмотрена ситуация последовательного сжатия пучка низкочастотных инерционно-гравитационных волн, распространяющихся от источника к берегу, в серии отражений от наклонного дна с постоянным углом наклона, моделирующего шельф. Это должно приводить к увеличе-

нию вероятности сдвиговой неустойчивости, обрушения волн и интенсификации турбулентного обмена по мере распространения пучка. Однако наличие переходной зоны в рельефе дна между свалом глубин и шельфом (зоны сопряжения) может существенно повышать интенсификацию обмена в системе переходная область – шельф. На рис. 3 представлена сравнительная схема трансформации волнового пучка при его отражении от определенной области переходной зоны (пучок 2) и при дальнейшем распространении к берегу, а также волнового пучка, сразу отражающегося от области шельфа (пучок 1), что было рассмотрено выше.

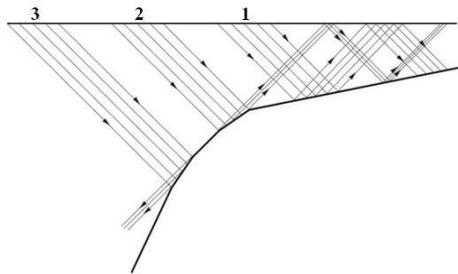


Рис. 3. Схематическое представление увеличения плотности энергии волнового пучка после отражения от переходной зоны при постоянной средней частоте  $N$  и отсутствии среднего течения. Исходные параметры пучков 1, 2, 3 одинаковы. Стрелками показано направление групповой скорости.

Из рис. 3 видно, что после первичного отражения от переходной зоны ширина пучка может стать сравнительно малой и при дальнейшем распространении сжиматься в результате последующих отражений. Формально, ширина отраженного пучка лучей может стать сколь угодно малой при соответствующем соотношении параметров падающей волны и отражающей поверхности (т.е. в определенной области переходной зоны). Последнее должно, вообще говоря, приводить к полному рассеянию этой части волновой энергии в окрестности переходной зоны. На рис. 3 показано также отражение пучка лучей назад от нижней части переходной зоны.

Отметим, что эффективность рассмотренного механизма интенсификации вертикального обмена зависит от того, насколько мало в среднем число Ричардсона в исходных пучках падающих волн. Теоретические и численные результаты, полученные ранее, свидетельствуют о том, что условие малости числа Ричардсона должно выполняться для природных низкочастотных волн. Например, в работе [5] показано, что в модельном климатическом спектре, не учитывающем диссипативные процессы, спектральная энергия в частотном спектре должна бесконечно возрастать с приближением к инерционной частоте. Энергия волнового поля остается при этом конечной. Отсюда следует вывод о том, что в естественных условиях, где диссипативные силы имеют место, внутренние волны не могут существовать вблизи инерционной частоты в соответствии с критерием неустойчивости по числу Ричардсона. Отсутствие спектральной энергии в указанном интервале частот демонстрируют и природные частотные спектры. Кроме того, в работах [6 – 8] показано, что в спектрах внутренних волн за счет нелинейных взаимодействий существует поток энергии из области волн средних масштабов в область малых вертикальных масштабов и низких частот. При этом общий уровень энергии в спектрах под-

держивается соответствующими источниками волновой энергии. Действие нелинейного механизма передачи энергии по спектру должно непрерывно пополнять энергию волн вблизи инерционной частоты, которая затрачивается на диссипацию, т.е. природные квазиинерционные волны должны находиться в пограничном режиме, близком к неустойчивому состоянию по указанному выше критерию. Это условие с учетом физической близости источников волн к рассматриваемой области должно способствовать эффективности действия обсуждаемого механизма перемешивания и вертикальной диффузии в зоне сопряжения шельфа и свала глубин.

**Совместное влияние переменной стратификации, сдвигового течения и рельефа дна на интенсификацию вертикального обмена.** Рассмотрим теперь случай распространения квазиинерционных внутренних волн при наличии среднего течения и переменной стратификации. Указанные условия, присущие зоне сопряжения шельфа и свала глубин, так же как и наличие наклонной твердой границы, могут вносить, как показано ниже, дополнительный вклад в интенсификацию вертикального обмена.

Для анализа трансформации плотности энергии внутренних волн в области свала глубин и на шельфе используется лучевое приближение, которое предполагает пренебрежимо малые изменения параметров среды – скорости среднего течения и частоты Брента-Вяйсяля – на масштабе волны [14]. Кроме того, в моделях, представленных ниже, сохраняется условие «твердой крышки» на поверхности модельного бассейна.

Рассматриваются квазиинерционные внутренние волны, распространяющиеся по нормали к берегу, на фоне среднего течения  $\bar{U} = \{0, V(x, z), 0\}$ . Система координат выбрана так, что ось  $x$  направлена в сторону уменьшения глубины, ось  $z$  – вертикально вниз, ось  $y$  – параллельно изобатам.

Дисперсионное соотношение для внутренних волн в лучевом приближении имеет вид [14]:

$$\omega = lV + \sqrt{\frac{N^2 k_h^2 + f^2 m^2}{k_h^2 + m^2}}, \quad (5)$$

где  $k_h = \sqrt{k^2 + l^2}$  – горизонтальная часть волнового числа;  $k, l, m$  – тройка волновых чисел для осей  $x, y, z$ ;  $f$  – параметр Кориолиса, оцениваемый для условий Черного моря как  $1,061 \text{ с}^{-1}$ .

В основе метода лучевого приближения лежат уравнения [14]:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial k}, \quad \frac{dy}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial l}, \quad \frac{dz}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial m}; \quad \frac{dk}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial x}, \quad \frac{dl}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial y}, \quad \frac{dm}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial z}. \quad (6)$$

Подставляя дисперсионное соотношение (5) в (6), получаем:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= \frac{km^2(N^2 - f^2)}{(N^2(k^2 + l^2) + f^2m^2)^{1/2}(k^2 + m^2 + l^2)^{3/2}}; \\
\frac{dy}{dt} &= V + \frac{lm^2(N^2 - f^2)}{(N^2(k^2 + l^2) + f^2m^2)^{1/2}(k^2 + m^2 + l^2)^{3/2}}; \\
\frac{dz}{dt} &= -\frac{m(k^2 + l^2)(N^2 - f^2)}{(N^2(k^2 + l^2) + f^2m^2)^{1/2}(k^2 + m^2 + l^2)^{3/2}}; \\
\frac{dk}{dt} &= -l \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{N \frac{\partial N}{\partial x}(k^2 + l^2)}{(N^2(k^2 + l^2) + f^2m^2)^{1/2}(k^2 + m^2 + l^2)^{1/2}}; \\
\frac{dm}{dt} &= -l \frac{\partial V}{\partial z} - \frac{N \frac{\partial N}{\partial z}(k^2 + l^2)}{(N^2(k^2 + l^2) + f^2m^2)^{1/2}(k^2 + m^2 + l^2)^{1/2}}; \quad \frac{dl}{dt} = 0.
\end{aligned} \right\} (7)$$

Система уравнений (7) позволяет построить траектории лучей с учетом их многократного отражения от верхней границы и наклонного дна. Отметим, что отражение луча от наклонного дна вперед происходит тогда, когда угол наклона дна меньше некоторого критического значения для каждой частоты [14]. Если угол наклона больше этого критического значения, луч отражается назад.

Отражение луча вперед от наклонного дна происходит, когда частота волны больше критического значения, определяемого по формуле

$$\omega_{кр} = lV + \sqrt{\frac{k^2 N^2 \operatorname{tg}^2 \gamma + k_h^2 f^2}{k_h^2 + k^2 \operatorname{tg}^2 \gamma}}, \quad (8)$$

где  $\gamma$  – угол наклона дна.

Если частота волны меньше этого критического значения, волна отражается назад.

Используя соотношение «термического ветра»  $f \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x}$  можно выписать зависимость между скоростью среднего течения и частотой плавучести для условий геострофического течения:

$$N(x, z) = \sqrt{f \int_0^x \frac{\partial^2 V(x', z)}{\partial z^2} dx' + N^2(0, z)}, \quad (9)$$

где  $N(0, z)$  – вертикальный профиль частоты плавучести в некоторой исходной для расчетов позиции  $x = 0$ .

В ходе выполнения работы было установлено, что сдвиговое геострофическое течение способно при определенных условиях концентрировать энергию падающих волн. Было проанализировано два существенно разли-

чающихся случая воздействия геострофического течения на энергетику волновых пучков.

В первом случае рассматривалось вдольбереговое течение, график вертикального распределения скорости которого имеет положительную кривизну (вторая производная скорости по  $z$  больше 0,  $\partial^2 V(x, z)/\partial z^2 > 0$ ). Из соотношения (9) следует, что это соответствует увеличению частоты Брента-Вяйсяля по мере приближения к берегу (для условий Черного моря это соответствует мористой части вдольберегового течения). Картина распространения волнового пучка при учете геострофического течения и наклонного дна представлена на рис. 4, *а*. В данном случае, так же как и при постоянной средней частоте плавучести и отсутствии среднего течения, наблюдается увеличение плотности энергии внутри лучевого пучка. Однако анализ показал, что сжатие волнового пучка определяется в этом случае только отражением волн от наклонного дна при распространении их к берегу. Было установлено, например, что в слое с постоянной глубиной увеличение частоты Брента-Вяйсяля по направлению к берегу приводит к некоторому расширению исходного пучка, см. рис. 4, *б*. В то же время по сравнению с влиянием эффекта сжатия пучка при отражениях от наклонного дна, данное расширение не оказывает преобладающего влияния на изменение плотности энергии в пучке для условий реального геострофического течения.

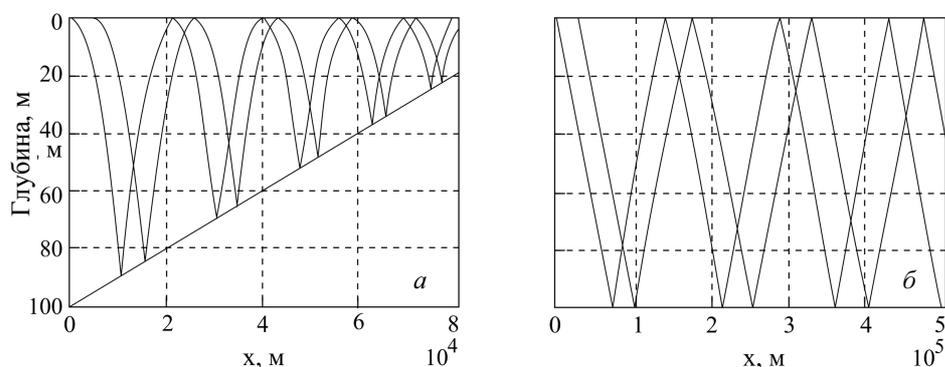


Рис. 4. Трансформация волнового пучка при учете геострофического вдольберегового течения, скорость которого увеличивается по направлению «к берегу»: *а* – в результате многократных отражений от наклонного дна; *б* – в слое постоянной глубины.

Во втором случае рассматривалось распространение пучка квазиинерционных волн к берегу в присутствии вдольберегового геострофического течения, график вертикального распределения скорости которого имеет отрицательную кривизну ( $\partial^2 V(x, z)/\partial z^2 < 0$ ). Это соответствует уменьшению частоты Брента-Вяйсяля по мере приближения к берегу. Отметим, что такая ситуация соответствует реальной структуре «прибрежной» части течения, наблюдаемого, например, в зоне сопряжения шельфа и континентального склона в Черном море, как составляющей Основного черноморского течения. На рис. 5, *а*, *б* представлены близкие к реальности модельные профили скорости среднего течения, соответственно, по глубине для

некоторой исходной вдольбереговой вертикальной плоскости  $x = 0$ , и по нормали к берегу на поверхности модельного бассейна. На рис. 5, *а* изображено близкое к реальности вертикальное распределение частоты плавучести для плоскости  $x = 0$ . В свою очередь, рис. 5, *б* описывает горизонтальное распределение частоты плавучести на поверхности модельного бассейна, полученное из соотношения «термического ветра» (9). В модельном бассейне для простоты предполагается отсутствие верхнего квазиоднородного слоя.

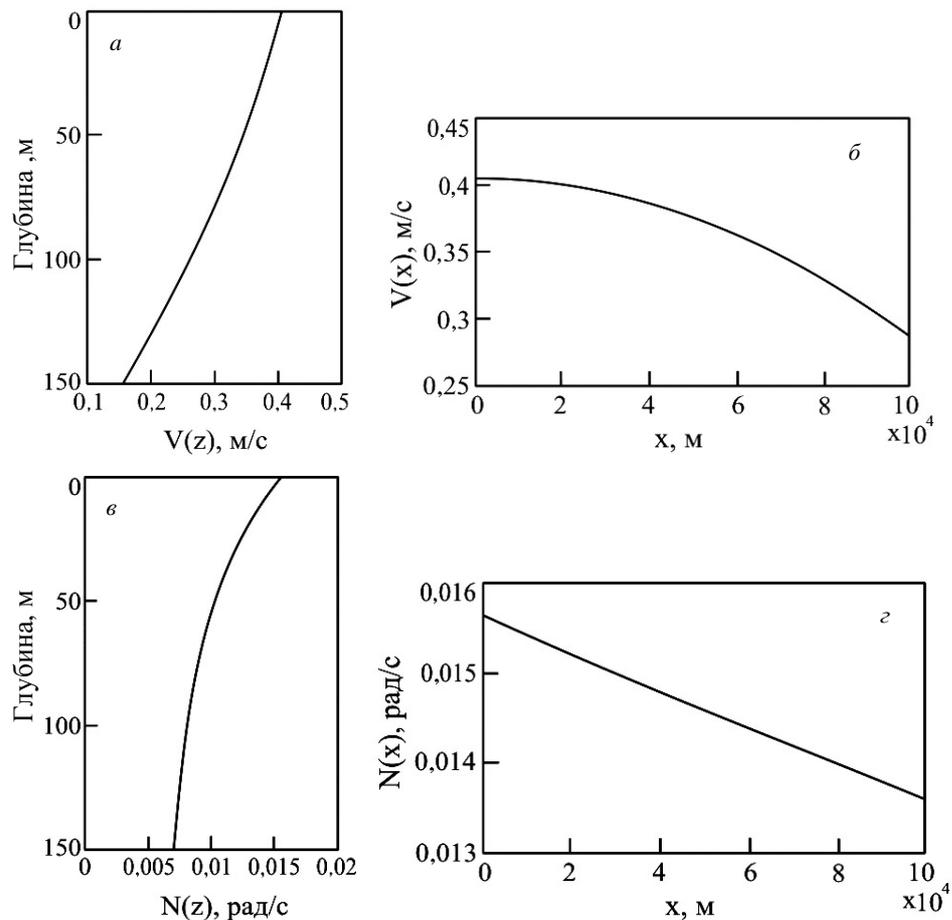


Рис. 5. Модельные пространственные распределения основных характеристик среды при учете геострофического вдольберегового течения, скорость которого уменьшается по направлению «к берегу»: *а* – распределение скорости среднего течения по глубине; *б* – горизонтальное распределение скорости среднего течения; *в* – распределение частоты плавучести по глубине; *г* – горизонтальное распределение частоты плавучести, рассчитанное по соотношению «термического ветра».

На рис. 6, *а* представлена картина распространения пучка лучей квазиинерционных волн для рассмотренного выше случая убывания частоты Брента-Вяйсяля по направлению к берегу в слое постоянной глубины. На рисунке хорошо прослеживается уменьшение расстояния между крайними лучами пучка по мере его распространения к берегу. В данном случае пучок,

пройдя расстояние по горизонтали 50 км, сузился в 1,2 раза (процент сужения 18 %), а пройдя 80 км – 2,6 раза (процент сужения 61 %) (здесь процент сужения показывает, на сколько процентов уменьшилось расстояние между лучами по сравнению с исходным).

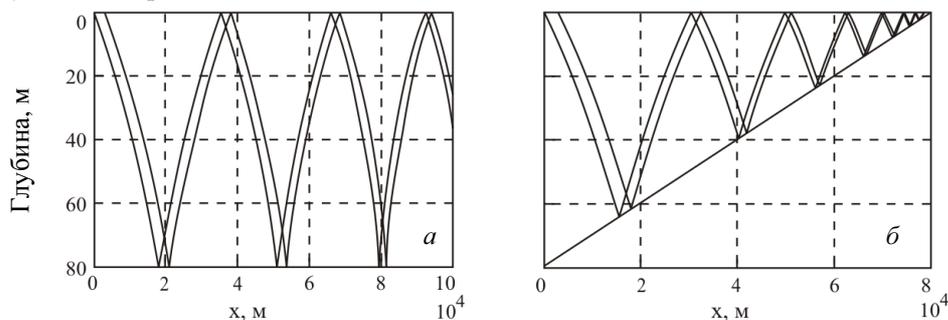


Рис. 6. Трансформация волнового пучка при учете геострофического вдольберегового течения, скорость которого уменьшается по направлению «к берегу»: *а* – в слое постоянной глубины; *б* – в результате многократных отражений от наклонного дна.

Этот результат свидетельствует о том, что даже при отсутствии наклонного дна геострофическое течение приводит к увеличению плотности энергии в волновом пучке в том случае, когда частота плавучести уменьшается по направлению к берегу. Следует сказать, что процесс сжатия пучка происходит в этом случае непрерывно, а не только в актах отражения пучка от дна, как в случае наклонного дна при отсутствии течения. Добавление наклонного дна приводит к дополнительному сжатию пучка лучей в актах отражения от него (см. рис. 6, *б*) и, следовательно, к усилению эффекта интенсификации вертикального турбулентного обмена за счет совместного эффекта наклонного дна (см. схему на рис. 2) и рассмотренной структуры геострофического потока. Коэффициент сужения в этом случае, при угле дна  $10^{-3}$ , после прохождения пучком расстояния по горизонтали 50 км, равен 2,5 (процент сужения 60%).

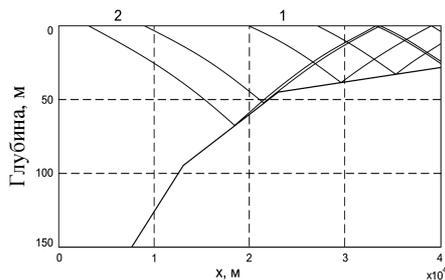


Рис. 7. Трансформация волнового пучка при учете геострофического вдольберегового течения, скорость которого уменьшается по направлению «к берегу», в результате отражения от различных участков переходной зоны. Исходные параметры пучков 1, 2 одинаковы.

На рис. 7 представлена картина распространения волновых пучков «к берегу» в присутствии вдольберегового геострофического течения, наблюдаемого в зоне сопряжения шельфа и континентального склона. Начальные характеристики пучков одинаковые.

Проведенный анализ приводит к выводу, что при распространении волнового пучка над зоной сопряжения шельфа и континентального склона, в присутствии вдольберегового геострофического течения, приводящего к уменьшению частоты Брента-Вяйсяля по направлению к берегу, происходит непрерывное сжатие. А после каждого отражения от наклонного дна (и скач-

кообразного сжатия пучка лучей) происходит дальнейшее непрерывное сближение крайних лучей пучка.

Этот вывод подтверждает предположения о том, что наличие переходной зоны существенно влияет на интенсификацию вертикального турбулентного обмена и является ключевым в процессе интенсификации в данной зоне.

При исследовании различных модельных пространственных распределений скорости геострофического течения и частоты Брента-Вяйсяля также было установлено, что уменьшение скорости геострофического течения по мере приближения к берегу приводит к более быстрому уменьшению частоты Брента-Вяйсяля по сравнению со случаем увеличения скорости геострофического течения с приближением к берегу. Рассмотрение модельных ситуаций позволило определить качественные характеристики, влияющие на усиление сжатия волнового пучка. Кроме наличия наклонного дна и убывания частоты Брента-Вяйсяля по мере уменьшения глубины к этим характеристикам можно отнести:

1) изменение угла хода лучей. Направляя лучи волнового пучка не по нормали к берегу, а в сторону, обратную направлению течения, получаем более быстрое сжатие пучка лучей;

2) более медленное изменение скорости геострофического течения по мере приближения к берегу. Случай более низкой скорости уменьшения скорости приводит к более быстрому уменьшению частоты Брента-Вяйсяля (в соответствии с формулой (9)) и соответственно к более быстрому сжатию пучка лучей;

3) увеличение крутизны распределения скорости среднего течения по глубине;

4) уменьшение разности между  $N(0, 0)$  и  $N(0, H)$ , где  $z = 0$  – поверхность,  $z = H$  – дно.

В данной работе также было рассмотрено распространение более высокочастотных, по сравнению с квазиинерционными, внутренних волн (см. рис. 8). Энергия волн не может распространяться ниже уровня  $N(x, z) = \omega$  (компоненты групповой скорости равны 0), поэтому лучи, достигнув глубины, соответствующей этому уровню, испытывают отражение, не достигнув дна [14]. При этом происходит сужение пучка лучей, так же как и при отражении от дна. Коэффициент отражения для распространения волнового пучка с такими частотами при прохождении лучей по горизонтали расстояния 50 км, равен 2,2 (процент сужения 54%), а расстояния 80 км – 3,7 (процент сужения 73%).

**Обсуждение результатов.** Результаты анализа эволюции пучка низкочастотных инерционно-гравитационных внутренних волн в зоне сопряжения континентального склона и шельфа при распространении из области генерации, расположенной на поверхности модельного стратифицированного бассейна, к берегу можно обобщить следующим образом:

1. Пучок волн, удовлетворяющих лучевому приближению, испытывает последовательные акты сжатия при отражении от наклонного дна в области шельфовой зоны вне зависимости от наличия или отсутствия вдольберегового течения с реальными характеристиками.

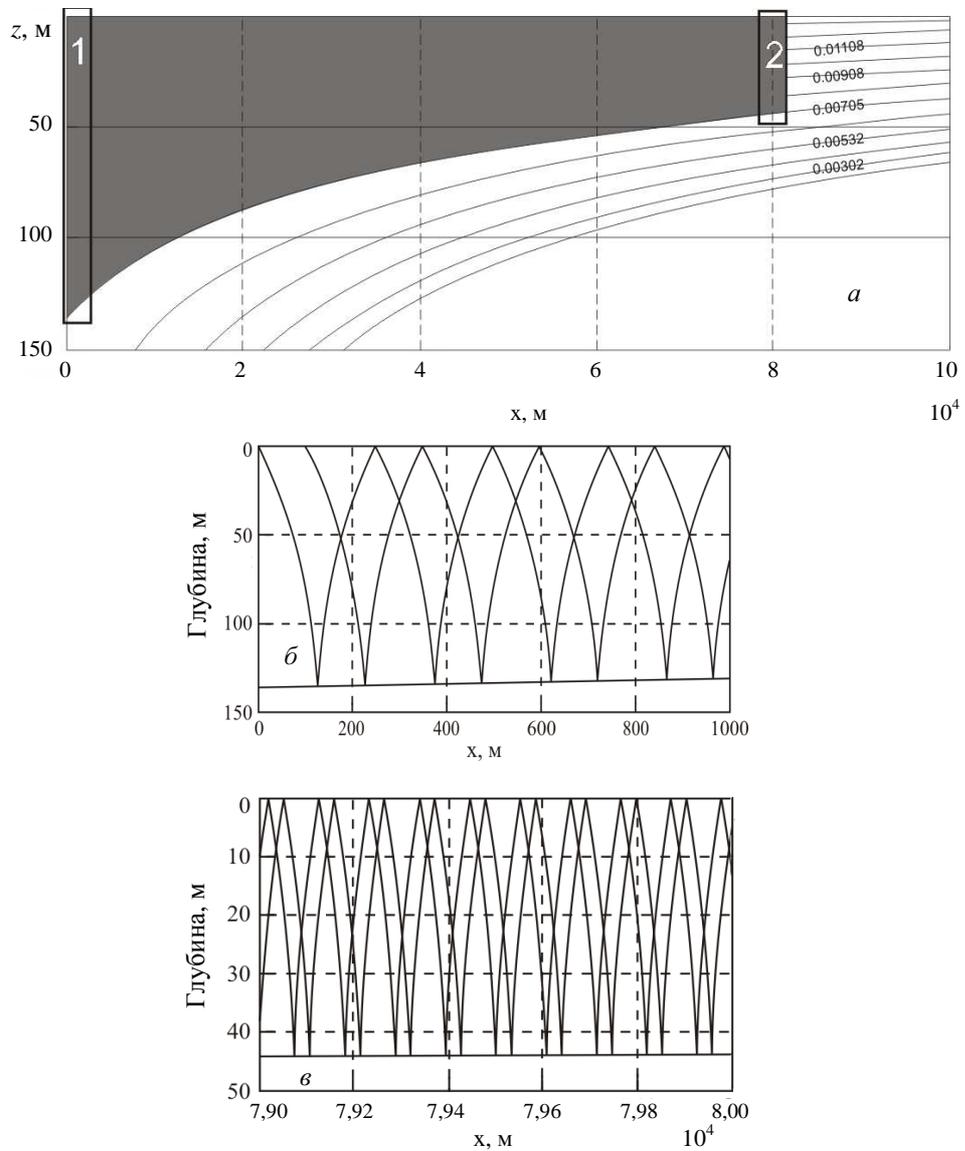


Рис. 8. Трансформация волнового пучка при распространении высокочастотных волн на уровне  $N(x, z) = \omega$  общий вид (а), для областей 1 (б) и 2 (в), отмеченных на рис. 8, а прямоугольниками.

2. Наличие переходной зоны в рельефе дна между континентальным склоном и шельфом способствует значительному локальному усилению степени сжатия отражающегося пучка волн.

3. Геострофическое вдольбереговое течение, для которого частота Брента-Вайсяля уменьшается в сторону уменьшения глубины (что характерно для такого рода течений в рассматриваемой области), оказывает дополнительное непрерывное сжимающее воздействие на пучок волн, распространяющихся к берегу, которое не зависит от актов отражения пучка от наклонного дна, а наличие переходной зоны существенно усиливает эффект сжатия.

За счет возрастания плотности энергии волн, выявленные механизмы сжатия пучков квазиинерционных волн должны приводить к росту их амплитуды (в данном случае, волновых квазигоризонтальных течений) с одновременным уменьшением вертикального масштаба. Вследствие сохранения энергии на единицу длины пучка, при уменьшении расстояния между лучами происходит увеличение плотности волновой энергии пропорциональное этому уменьшению. Если расстояние между лучами уменьшается от величины  $z_1$  до величины  $z_2$ , то отношение плотностей энергии  $E_1/E_2 = z_1/z_2$ . Отсюда следует, что отношение амплитуд скоростей составляет величину  $U_2/U_1 = \sqrt{z_1/z_2}$ , и тогда отношение значений чисел Ричардсона имеет вид  $Ri_2/Ri_1 = (N_2/N_1)^2 (z_2/z_1)^3$ . Для рассмотренных выше случаев распространения энергии в условиях шельфа, когда коэффициент сжатия лучей расположен в диапазоне 1,2 – 3,7, указанное отношение (без учета изменения частоты плавучести) изменяется в пределах 0,6 – 0,02. А для отдельных участков зоны сопряжения оно может быть сколь угодно малым (см., например, рис. 7). Это, в свою очередь, приводит к возрастанию вероятности сдвиговой неустойчивости в поле волн по критерию Ричардсона, увеличению скорости диссипации энергии и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в зоне сопряжения континентального склона и шельфа по сравнению с районами открытого моря (океана).

Полученные результаты дают основание предполагать, что установленный нами ранее факт существенного (в среднем приблизительно на порядок величины) увеличения значений скорости диссипации энергии и коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в зоне сопряжения континентального склона и шельфа в Черном море по сравнению с открытым морем при одинаковой стратификации [9 – 11], объясняется действием предложенных в настоящей работе механизмов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov L.I., Samodurov A.S.* The role of lateral fluxes in ventilation of the Black Sea // *J. Mar. Sys.* – 2001. – 31, № 1-3. – P. 159-174.
2. *Самодуров А.С., Иванов Л.И.* Балансовая модель для расчета средних вертикальных потоков жидкости, тепла, соли и растворенных химических веществ в термохалоклине Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 2002. – № 1. – С. 7-24.
3. *Wunsch C., Ferrari R.* Vertical mixing, energy, and the general circulation of the ocean // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 2004. – 36. – P. 281-314.
4. *Самодуров А.С.* Модель климатического спектра внутренних волн в океане // *Океанология.* – 1982. – том 22, № 2. – С. 182-185.
5. *Самодуров А.С., Любицкий А.А., Пантелеев Н.А.* Вклад опрокидывающихся внутренних волн в структурообразование, диссипацию энергии в вертикальную диффузию в океане // *Морской гидрофизический журнал.* – 1994. – № 3. – С.14-27.
6. *McComas C.H., Muller P.* The dynamic balance of internal waves // *J. Phys. Oceanogr.* – 1981. – 11. – P.970-986.
7. *Henye F.S., Wright J., Flatte S.M.* Energy and action flow through the internal wave field: An eikonal approach // *J. Geophys. Res.* – 1986. – vol. 91. – P. 8487-8495.

8. *Winters K.B., D'Asaro E.A.* Direct simulation of internal wave energy transfer // *J. Phys. Oceanogr.* – 1998. – 27. – P. 1937-1945.
9. *Самодуров А.С., Чухарев А.М.* Оценка интенсивности вертикального турбулентного обмена в Черном море по экспериментальным данным // *Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря*. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2006. – вып. 14. – С. 524-529.
10. *Самодуров А.С., Чухарев А.М.* Экспериментальная оценка коэффициента вертикального турбулентного обмена в стратифицированном слое Черного моря в окрестности свала глубин // *Морской гидрофизический журнал*. – 2008. – № 6. – С. 14-24.
11. *Иванов В.А., Самодуров А.С., Чухарев А.М., Носова А.В.* Интенсификация вертикального турбулентного обмена в районах сопряжения шельфа и континентального склона в Черном море // *Доп. НАН України*. – 2008. – № 6. – С. 108-112.
12. *Дыкман В.З., Багимов И.С., Барабаш В.А., Ефремов О.И., Зубов А.Г., Мязин В.В., Павленко О.И., Самодуров А.С., Чухарев А.М.* Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования процессов перемешивания и диссипации энергии в верхнем слое моря // *Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря*. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2004. – вып. 10. – С. 395-409.
13. *Samodurov A.S., Ivanov L.I.* Mixing and energy dissipation rate in Mediterranean seas: an intercomparison of existing models // *Oceanography of the eastern Mediterranean and Black Sea, Similarities and differences in two interconnected basins*. – Ankara: Tubitak publ. – 2003. – P. 369-375.
14. *Ле Блон П., Майсек Л.* Волны в океане. – М.: Мир, 1981. – том 1. – 478 с.

Материал поступил в редакцию 13.10.2011 г.

**АНОТАЦІЯ** Досліджуються особливості трансформації щільності енергії квазі-інерційних внутрішніх хвиль в зоні сполучення шельфу і звалювання глибин на неоднорідній стратифікованій течії в променевому наближенні. Показано, що при поширенні хвиль з відкритого моря в досліджуваній області за рахунок процесів заломлення і віддзеркалення відбувається стискування вихідних хвильових пучків променів від джерел, що приводить до зростання щільності хвильової енергії. Зростання щільності хвильової енергії повинне викликати, у свою чергу, підвищення інтенсивності хвильового перемішування і зростання коефіцієнта вертикального турбулентного обміну в таких районах в порівнянні з областю відкритого моря. Цей висновок узгоджується з результатами аналізу тонкоструктурних вимірів, зібраних в ході натурних експериментів у відповідних районах Чорного моря.

**ABSTRACT** The features of the transformation of the energy density of quasi-inertial internal waves in the connection area of the shelf and continental slope on a non-uniform stratified flow are studied in the ray approximation. It is shown that the propagation of waves from the open sea in the investigated area due to the processes of refraction and reflection is accompanied by the compression of the initial wave beam radiation from sources, which leads to an increase in the density of wave energy. Increase in the density of wave energy should cause, in turn, increase the intensity of the wave mixing and increase the coefficient of vertical turbulent exchange in these areas compared to the open sea area. This finding is consistent with the analysis of fine-structure measurements collected during field experiments in the corresponding areas of the Black Sea.