

ПРОВ 98

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРОВ 2010

к 4748 - В 86

1.04.86

УДК 551.466.2/4 + 627.223.6

В.А.Иванов, Н.И.Чекменева

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВЯЙСЯЛЯ-БРЕНТА
И СТРУКТУРА ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ЧЕРНОМ МОРЕ

Институт биологии
южных морей АН УССР

БИБЛИОТЕКА

№ 94 деп

Севастополь, 1986

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВЯЙСЯЛЯ-БРЕНТА И СТРУКТУРА ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ЧЕРНОМ МОРЕ

Одной из основных океанологических характеристик устойчиво стратифицированной среды является частота Вайсяля-Брента .

Имея смысл частоты свободных колебаний частиц жидкости, она характеризует плотностную стратификацию, является основным параметром, определяющим возникновение, характер и распространение внутренних волн. Следовательно, изучение особенностей вертикального распределения частоты Вайсяля-Брента имеет большое значение.

В ряде работ рассматривался вопрос о законе изменения $N(z)$ в глубинных слоях для различных районов Мирового океана [1]. Более подробно распределение частоты Вайсяля-Брента изучено в Каспийском море [2]. В Черном море некоторые исследования изменчивости $N(z)$ были проведены, в основном, в летний период [3].

Цель работы - выявить общие закономерности в вертикальном распределении частоты Вайсяля-Брента в Черном море для различных сезонов, а также определить возможные параметры и структуру внутренних волн.

Анализ распределения $N(z)$ выполнен по многолетним гидрологическим наблюдениям в открытой части Черного моря за 1957-1976 годы и в районах шельфа (Южный берег Крыма и Кавказское побережье) за 1924-1977 годы.

По этим данным проведен расчет и типизация частоты $N(z)$, выделены её сезонные виды. Типовые кривые сезонного распределения частоты рассчитывались по характерным вертикальным профилям условной плотности $\sigma_t(z)$ для каждого сезона по упрощенной формуле

$$N(z) = 56,04 \left(\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta z} \right)^{1/2}, \text{ ц/час.}$$

В зависимости от положения максимумов частоты, их количества и интенсивности были определены типы вертикального распределения $N(z)$.

Анализ полученных данных показал, что в зимне-весенний период года (с декабря по апрель) встречаются два типа распределения частоты Вайсяля-Брента по глубине (рис. I |12|).

Первый тип (рис. I |1|) соответствует случаю, когда до 100 м наблюдается однородный слой воды с постоянными значениями $N(z)$, не превышающими 3 цикл/ч. В слое скачка плотности на глубине 160-170 м отмечается возрастание значений до 7 цикл/ч. Подобный тип вертикального распределения частоты встречается преимущественно у Крымского побережья (район Ялты) с декабря по март, в Основном Черноморском потоке - в январе и в Прибосфорском районе - в апреле.

Второй тип характеризуется постепенным возрастанием частоты Вайсяля-Брента (рис. I |2|) от поверхности до 100 м, где она достигает значения 8 цикл/ч. В слое 100-500 м наблюдается её уменьшение до 2 цикл/ч и затем, глубже 500 м, незначительное убывание до 0,5-1,0 цикл/ч, на горизонте 1000м. Такой тип вертикального распределения частоты Вайсяля-Брента встречается у берегов Кавказа с января по март, в Прибосфорском районе в феврале-марте, в северо-восточной части моря, у восточного берега Крыма, в центральной части моря и в Основном Черноморском потоке. В зимнее время на распределение $N(z)$ по глубине температура и соленость влияют примерно одинаково. В области максимального расширения волновода величина частоты Вайсяля-Брента колеблется в пределах 3-4 цикл/ч.

В апреле уже заметно влияние прогрева моря и, соответственно, появление небольшого сезонного слоя скачка. Это обстоятельство отражается на изменении $N(z)$. В отличие от первого типа, весной в изменении $N(z)$ с глубиной в поверхностном слое до 20 м наблюдаются максимальные значения. Кривые $N(z)$ третьего типа (рис. I, |3|) имеют наибольшие значения в слое 10-20 м и наблюдаются, в основном, в апреле в центральной части Кавказского побережья и в мае в районе Южного берега Крыма (ЮБК).

Четвертый тип (рис. I |4|) встречается в мае, июне у Кавказского побережья и в Прибосфорском районе. Отличительной чертой его является то, что максимальные значения $N(z)$

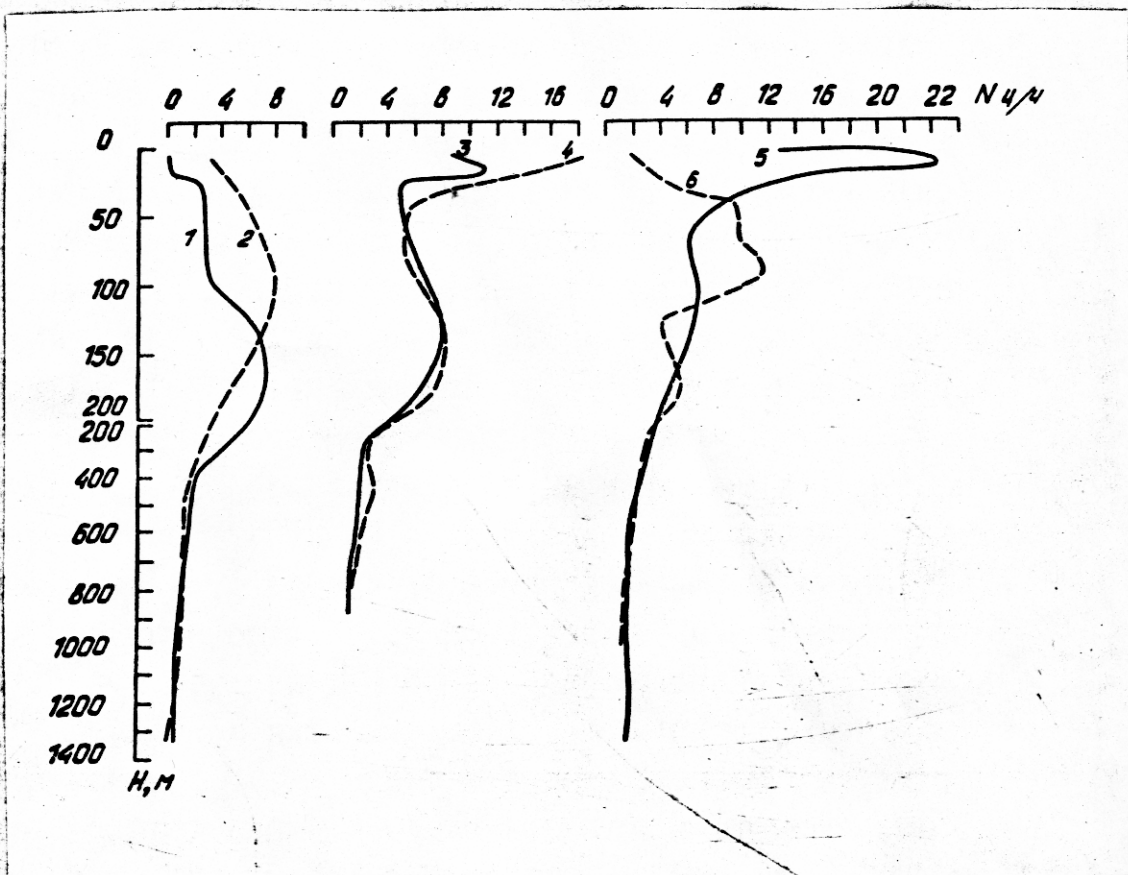


Рис. I. Типовые кривые вертикального распределения частоты Вайселя-Брента в глубоководной части моря.

поднимаются уже в поверхностный слой 0-10 м и возрастают до 18 цикл/ч.

Аналогично типам холодного периода, максимум частоты на глубине 150-170 м сохраняется и имеет ту же величину (8 цикл/ч).

В распределении частоты по глубине в это время года увеличивается роль температуры в поверхностном слое.

В летнее время года (с июля по сентябрь) верхние слои воды хорошо прогреты. Сезонный слой скачка σ_t резко выражен на горизонтах от 0 до 20 м. Следовательно, на кривых распределения частоты Вьяйсяля-Брента в этом слое наблюдаются максимальные значения (рис. I.15). В районе Южного берега Крыма величина частоты в июле достигает 24-25 цикл/ч. Кроме того, для теплого времени года характерно уменьшение максимума $N(z)$ в основном слое скачка (от 100 до 200 м) до 6 цикл/ч. Такой тип изменения $N(z)$ с глубиной встречается во всех районах моря.

В октябре-ноябре заметную роль начинают играть конвективные процессы, сезонный слой скачка заглубляется и в распределении частоты Вьяйсяля-Брента наблюдается перестройка. Верхний максимум опускается до глубины 75 м и имеет "двухгорбую" структуру (рис. I.16). Его величина уменьшается до 10-12 цикл/ч. В нижнем слое 150-200 м опять появляется второй максимум $N(z)$, хотя и незначительный (до 5-6 цикл/ч). Подобное распределение частоты по глубине встречается во всех районах моря в ноябре-декабре.

В шельфовой зоне Крыма (районы Ялты, Севастополя) и Кавказа (районы Сочи, Пицунды, Батуми) особых изменений в распределении частоты Вьяйсяля-Брента по глубине, в отличие от глубоководных районов, не наблюдается (рис. 2).

В зимний период у берегов ЮБК частота $N(z)$ имеет практически постоянные значения до глубины 90 м (рис. 2, Па). В отличие от этого, у берегов Кавказа, особенно Батуми, т.е. в южной части, даже в холодное время года сохраняются наибольшие значения частоты Вьяйсяля-Брента в поверхностном слое (до 9-10 цикл/ч), а с глубиной незначительные её изменения (Пицунда, Батуми) (рис. 2, Ia).

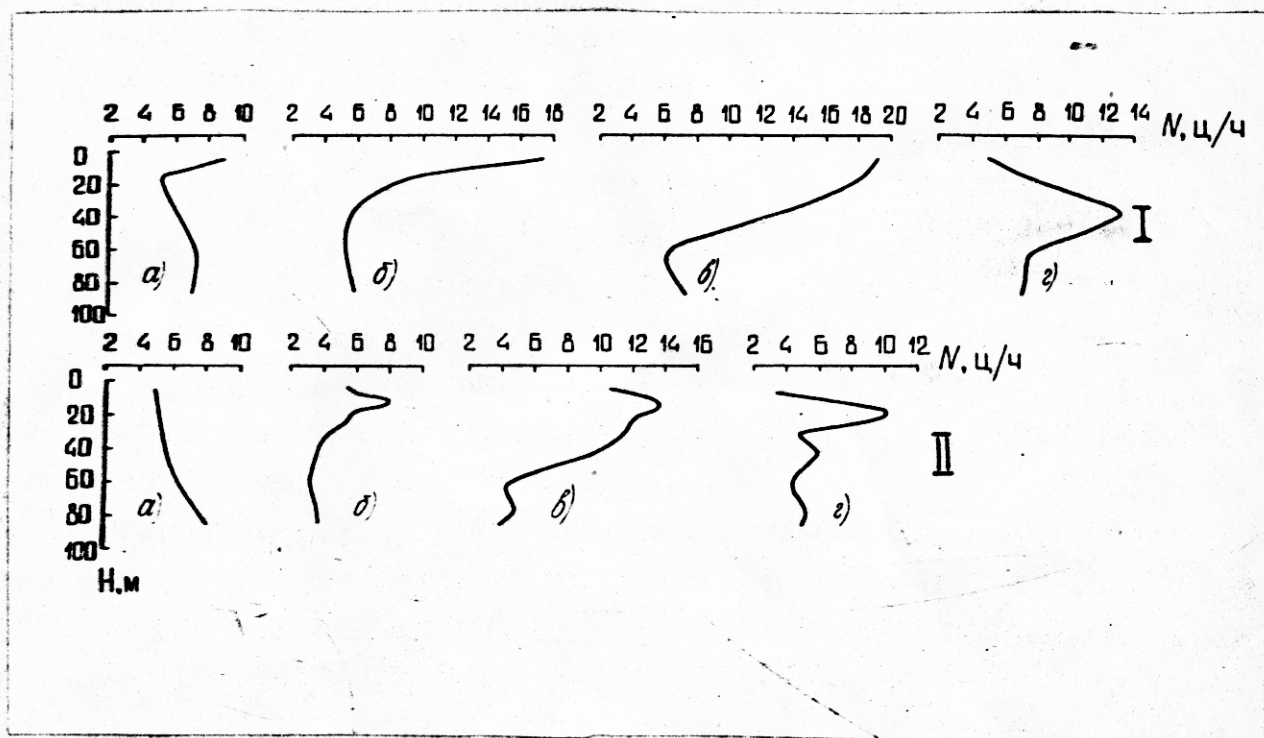


Рис. 2. Типовые кривые вертикального распределения частоты Вайсяля-Брента в шельфовой зоне моря (I - район Кавказского побережья; II - район ЮБК)

Весной некоторое увеличение значений $N(z)$ в поверхностном слое не меняет общей картины в распределении (рис.2 б). Величина $N(z)$ у берегов Кавказа, особенно у Батуми (от 14 до 22 цикл/ч в поверхностном слое), несколько выше, чем у берегов Крыма (9-10 цикл/ч).

Летний тип распределения $N(z)$ повторяется и в шельфовой зоне (рис.2 в). Максимальные значения достигают величины 20 цикл/ч в поверхностных слоях приглубых шельфов Кавказа. У берегов Ялты они несколько ниже (до 16 цикл/ч).

Осенью наибольшие значения частоты (рис.2 г) находятся в слое 25-50 м у берегов Кавказа (до 12-13 цикл/ч) и в слое 10-25 м у берегов Крыма (12 цикл/ч).

Таким образом, проведенные исследования показали, что диапазон изменения частоты Вайсяля-Брента различен: 10-25 цикл/ч в слое 0-50 м (сезонный термоклин), 5-8 цикл/ч - 50-200 м (главный пикноклин), 0,5-2 цикл/ч - 200-2000 м (глубоководная зона моря). В летний период значения частоты

$N(z)$ максимальны, к зиме они уменьшаются, причем в шельфовой зоне в сезонном термоклине значения $N(z)$ несколько ниже, чем в глубоководных районах.

По полученным типовым кривым вертикального распределения частоты Вайсяля-Брента рассчитывались возможные параметры волн (λ - длина волны, C_ϕ - фазовая скорость, $C_{гр}$ - групповая скорость) и были получены дисперсионные соотношения на основе численного решения волнового уравнения:

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + K^2 \frac{N^2 - \omega^2}{\omega^2 - f_{ин}^2} W = 0, \quad (I)$$

с граничными условиями на поверхности и на дне

$$\left[\frac{dW}{dz} + \frac{gK^2}{\omega^2 - f_{ин}^2} W \right] \Big|_0 = 0, \quad W|_H = 0.$$

Уравнение (I) решалось методом Хаскелла, модифицированным В.В.Гончаровым [4], для периодов: 3,5,10,15,20,30,40 мин; 1,2,3,4,6,8,10,12,14,15 час. По полученным результатам были построены дисперсионные кривые (рис.3,4).

Анализ этих материалов показал, что зависимость характеристик внутренних волн от $N(z)$ в Черном море носит довольно сложный характер. В диапазоне низких частот (до 0,25-0,33 цикл/ч) для волн всех 10 мод наблюдается резкий подъем кривых $v(\omega)$ до наибольших значений, затем в диапазоне от 0,33 до 6 цикл/ч - их спадание. Высокие частоты до 20 цикл/ч характеризуются медленным постепенным уменьшением скорости.

Следует отметить ряд аномальных частот, где групповая скорость достигает экстремальных значений. Так, в зимний период экстремумы наблюдаются на частотах 2-3 цикл/ч для волн 6, 7, 9, 10 мод. Весной появляется максимум групповой скорости 8 внутренней моды и минимум 2 и 3 моды на частотах 1,5-2 цикл/ч. В летнее время года небольшие максимумы заметны для волн 2, 8, 10 мод на частотах 2-3 цикл/ч. Осенью наблюдается резкое возрастание групповой скорости 4 внутренней моды на частоте 3 цикл/ч и незначительные повышения её для волн 7, 8, 9 мод на частотах 2-3 цикл/ч.

В.В.Гончаровым было показано на примере Атлантического океана [4], что аномалии возникают в случае, когда стратификация соответствует двум или более слабо связанным волноводам. Именно в окрестности частот, при которых некоторое собственное значение одного волновода совпадает с каким-либо значением другого и возникают аномалии в дисперсионных зависимостях. Причем, критические частоты должны соответствовать высоким модам приповерхностного (сезонного) пикноклина и низким - основного.

Наибольшие значения скорости внутренних волн наблюдаются при летнем типе распределения $N(z)$. Но несмотря на это, максимальная групповая скорость соответствует I внутренней моде в зимний период (тип распределения $N(z)$), начиная с $\omega < 3,5$ цикл/ч. Весной и осенью значения групповой скорости выше, чем зимой, но ниже летних для одних и тех же частот. Наименьшие величины C_{ϕ} и $C_{гр}$ встречаются летом для $\omega > 6$ цикл/ч.

Анализ дисперсионных зависимостей $\omega = \omega(k)$ (рис.3) показал, что по своему виду они напоминают семейство относительно параллельных линий. В связи с изменениями основного

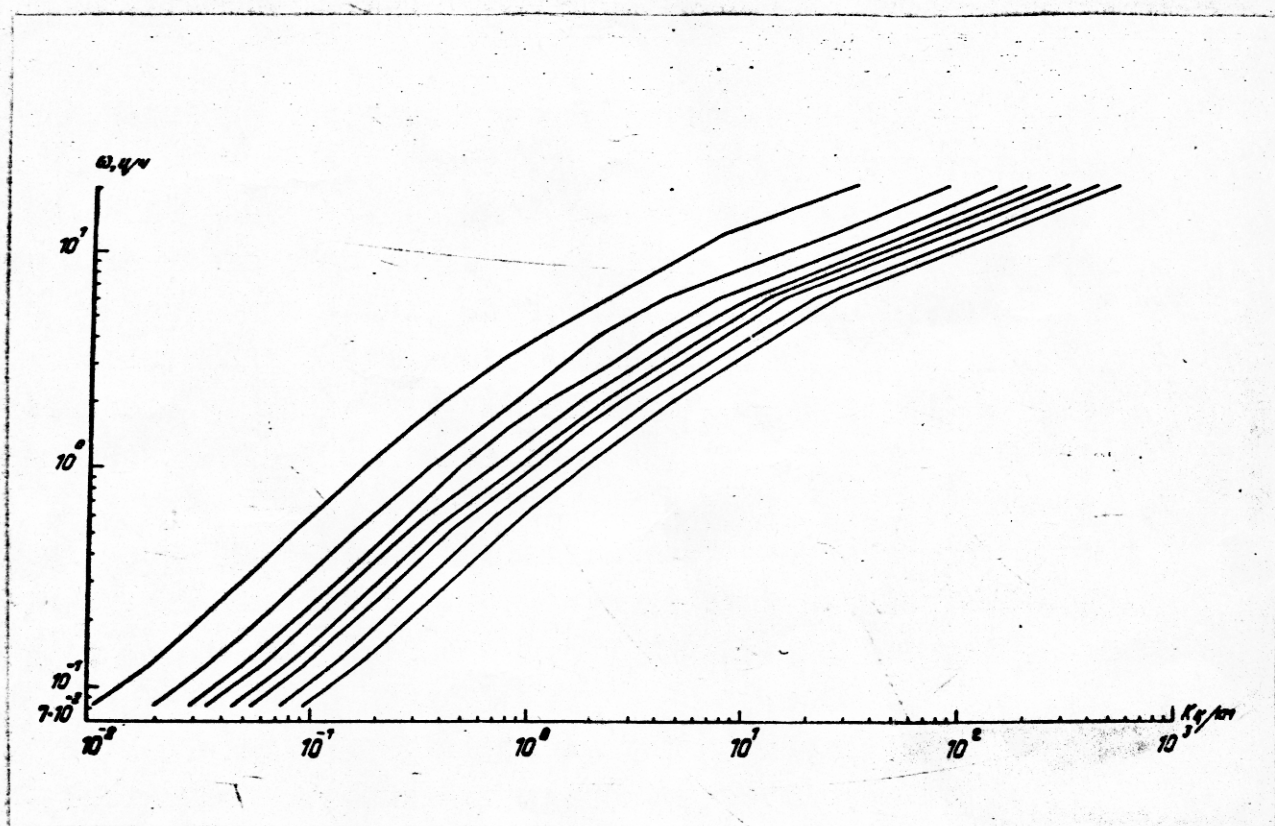


Рис. 3. Дисперсионные кривые (ω, κ) для 10 мод, рассчитанные по У типу (летний период) распределения частоты Вайсяля Брента для глубоководной части моря.

слоя скачка и появлением сезонного, т.е. от зимы к лету наблюдается отклонение дисперсионных кривых влево. Особенно ярко это проявляется при $\omega > 3$ цикл/ч ($T \approx 20$ мин).

Следовательно, внутренние волны больших длин встречаются в летний период. Так, при частоте 6,0 цикл/ч длина волны I моды зимой изменяется от 163-264 м, летом - 385 м, У моды - 14,8 - 31,6 и 73 м соответственно. При $\omega = 1$ час длина волны 3 внутренней моды зимой составляет 1490-1511 м, летом - 2011 м.

Исключение составил случай, когда длины волн I внутренней моды, начиная с частоты $\omega > 3$ цикл/ч при распределении $N(z)$ по первому типу (зима), были больше, чем в летний период. Это можно объяснить тем, что эти волны соответствовали основному слою скачка, который летом слабо развит.

Характер изменения собственных функций $W_n(z)$ с глубиной показывает, что максимум амплитуд колебаний первой моды сосредоточен в слое, где наблюдается максимум частоты Вайселя-Брента и уменьшается к поверхности и ко дну по экспоненте. В этих слоях наибольшие амплитуды встречаются зимой. Так, например, для первой внутренней моды значение амплитуды достигает 12,6 м для I типа и 9,5 м для II типа распределения $N(z)$ при $\omega = 2,0$ цикл/ч.

Если считать, что колебания гидрофизических характеристик, вызванные внутренними волнами, существенны при $\omega \geq \frac{1}{2} \omega_{max}$, то можно для вод различных типов выделить слои, в которых при анализе наблюдений необходимо учитывать колебания с определенными периодами. Для колебаний первой моды толщины этих слоев приведены в табл.1.

Расчет собственных функций и дисперсионных соотношений по уравнению (I) был проведен и для прибрежной части Черного моря.

Анализ фазовых (групповых) скоростей внутренних волн в прибрежных районах показал, что их величины на порядок меньше, чем в открытых частях моря. Если значения скорости внутренней волны I моды могут достигать величин 1,6-1,9 м/с, то в прибрежных районах - 0,2-0,6 м/с при частоте $\omega = 0,33 - 0,5$ цикл/ч (периоде 3-2 час). На шельфе Кавказа фазовая (групповая) скорость несколько выше, чем на шельфе Крыма. Так,

Таблица 1

Теоретические параметры
внутренних волн

тип		6 цикл/ч	4 цикл/ч	3 цикл/ч	2 цикл/ч	1,5 цикл/ч	1 цикл/ч
Зима	I	115-225	70-350	80-465	90-780	90-800	95-870
	II	40-170	40-270	50-360	60-590	60-780	70-960
Весна	III	60-195	55-275	57-380	63-540	66-620	66-660
	IV	30-185	50-277	55-410	60-650	70-700	75-730
Лето	V	12-175	33-280	40-395	54-650	60-780	75-970
Осень	VI	32-157	35-260	37-390	45-600	52-800	65-960

в зимний период в районе м.Пицунда могут встречаться волны со скоростью 0,17-0,3 м/с на частотах 6-3 цикл/ч (периоды 10-20⁷) в то время, как в районе Южного берега Крыма скорость внутренней волны равна 0,01-0,13 м/с на этих же частотах. Общий вид зависимости групповых скоростей от частоты в прибрежных районах моря в основном такой же, как и в открытых его частях. Кривые имеют более пологий вид. Максимумы скорости выражены менее резко и могут наблюдаться на частотах от 0,25 до 0,50 цикл/ч. Аномальных частот не наблюдается.

Вид дисперсионных кривых $\omega = \omega(k)$ (рис.4), рассчитанных для прибрежных районов, мало чем отличается от вида дисперсионных зависимостей для открытых частей моря. Они представляют собой семейство относительно параллельных линий, которые сверху и снизу сходятся к N_{max} и f - инерционной, соответственно. Наблюдается резкое отклонение кривых влево, особенно начиная с $\omega = 4$ цикл/ч, в зависимости от сезонных изменений слоя скачка. Но можно отметить, что в шельфовых районах Крыма и Кавказа длины волн на порядок меньше, чем в открытых районах моря. Так, в летний период, при периоде 10 минут ($\omega = 6$ цикл/ч), длина внутренней волны I моды в районе Крыма может достигать 300 м, а в открытых районах моря - 380 м. По дисперсионным зависимостям видно, что в летний период длина волны больше, чем в зимний. Так, при частоте $\omega = 6$ цикл/ч длина волны I внутренней моды летом равна 300 м, зимой - 6 м. Кроме того, существенные различия отмечаются в зависимости от географических условий. Если в шельфовой зоне Крыма зимой могут встречаться внутренние волны от 6 до 690 м (для I моды) при ω от 6 до 1 цикл/ч, то в шельфовых районах Кавказа, в частности, в районе м.Пицунда, где более теплые зимы, волны могут изменяться от 104 до 1320 м при тех же частотах.

По виду распределения собственных функций $W_n(z)$ заметно, что наибольшие амплитуды колебаний внутренних волн первой моды сосредоточены в слоях с максимальными значениями частоты Вайсяля-Брента. В этих слоях в летний период в шельфовой зоне Крыма величины амплитуд могут достигать 2,65 м, начиная с $\omega = 6,0$ цикл/ч, зимой несколько меньше - 1,85 м, начиная с $\omega = 3,0$ цикл/ч. Но на шельфе Кавказского побережья

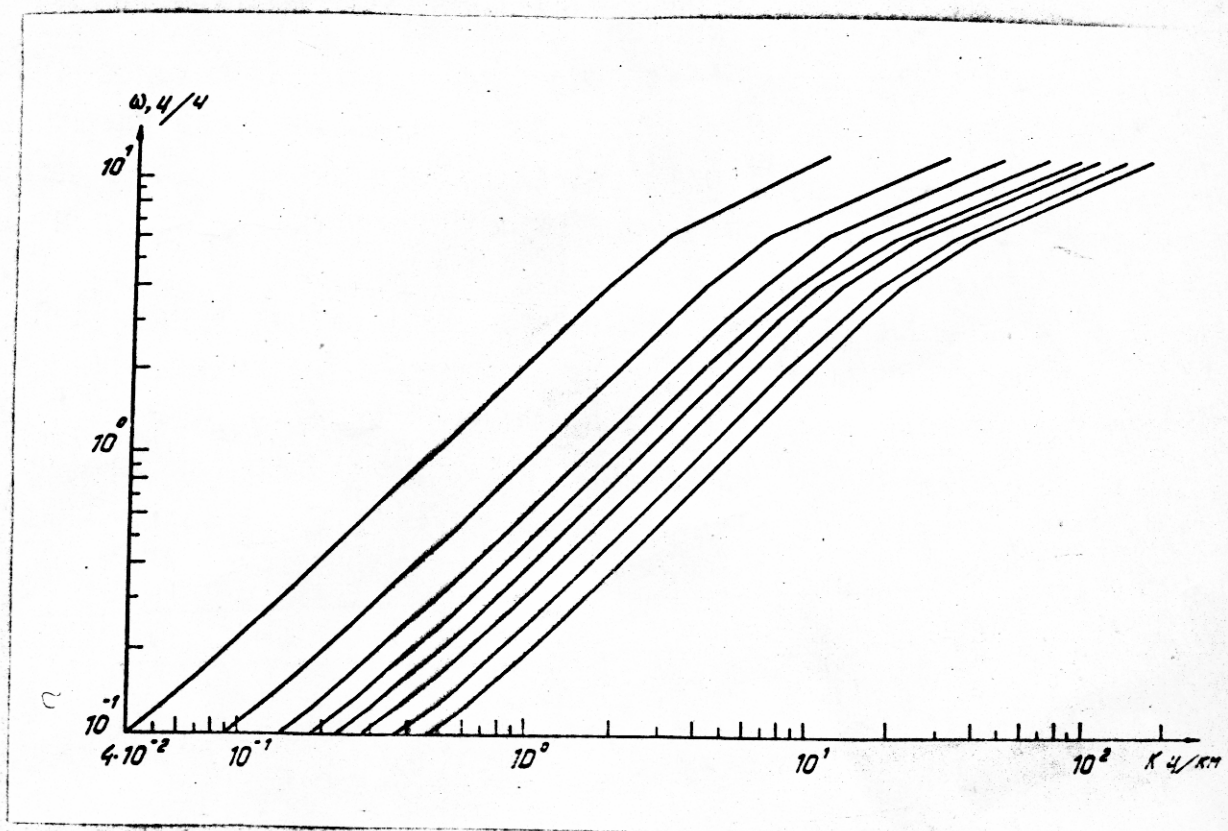


Рис. 4. Дисперсионные кривые (ω, κ) для 10 мод, рассчитанные по распределению частоты Вайселя-Брента в летний период для шельфовой зоны моря.

в зимний период величина амплитуды может достигать 2,75 м при тех же частотах.

В заключение можно сделать выводы:

В Черном море в различные сезоны года выделяется 6 видов вертикального распределения частоты Вайсяля-Брента.

Различия в распределении $N(z)$ существенно влияют на пространственно-временные характеристики волн.

Наибольшие фазовые (групповые) скорости и длины внутренних волн наблюдаются в летний период. В зимнее время существует однородный слой воды почти до 100 м, где характеристики первой внутренней моды достигают максимальных величин.

Полученные дисперсионные соотношения внутренних волн для вод различных типов вертикального распределения частоты Вайсяля-Брента позволяют оценить параметры волн, возникновения которых возможно в любой период года в Черном море.

Литература

1. Монин А.С., Нейман В.Г., Филюшкин Б.Н. О стратификации плотности в океане. Доклады АН СССР, 1970, т.191, №6, с.1277-1285.
2. Иванов В.А., Косарев А.Н. и др. Распределение частоты Вайсяля в Каспийском море. "Учен.зап. Минвуза Аз.ССР", 1974, №6, с.672-682.
3. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Под ред. Б.А.Нелепо, Л.Гидрометеониздат, 1984, с.240.
4. Гончаров В.В. О некоторых особенностях внутренних волн в океане. - В сб. "Цунами и внутренние волны". Севастополь, 1972, с.87-96.

Печатается в соответствии с решение Ученого Совета
Морского гидрофизического института АН УССР от 10 января
1986 г.

В печать 01/7.6.86

Тир. /

Цена 1 руб. 60 коп.

Зак. 32792

Производственно-издательский комбинат ВИНТИ
Люберцы, Октябрьский пр., 403

