

УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СЕЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ

О. Д. Шишкина (Нижний Новгород)

В работе представлены результаты исследования особенностей формирования пространственной структуры линейных (периодических) и нелинейных (уединенных) внутренних волн вблизи кромки шельфа юго-западного побережья Каспийского моря.

В отличие от морей, имеющих выход в открытый океан, влияние приливных течений во внутренних морях относительно мало. В закрытых водоемах внутренние возмущения в толще воды возникают под влиянием атмосферных полей и силы Кориолиса [1]. Типичным примером такого водоема является Каспийское море.

Рассматриваемый в работе случай генерации внутренних волн представляет результат одновременного воздействия силы Кориолиса на стратифицированную жидкость в замкнутом водоеме, а также обтекания донной неровности вертикально неоднородным потоком жидкости. В результате чего исследуемые внутренние волновые возмущения одновременно имеют параметры, характерные как для свободных волн Кельвина (период генерации), так и вынужденных волн (модовую вертикальную структуру).

В границах исследуемой акватории (рис. 1), в зависимости от сезона (вертикального профиля стратификации), наблюдаются нелинейные уединенные внутренние волны понижения с выраженной асимметрией профиля (левая вставка на рис. 2а) или периодические смещения пикноклина с вертикальной структурой, типичной для независимого пространственного распространения низших мод линейных внутренних волн (левая вставка на рис. 2б).

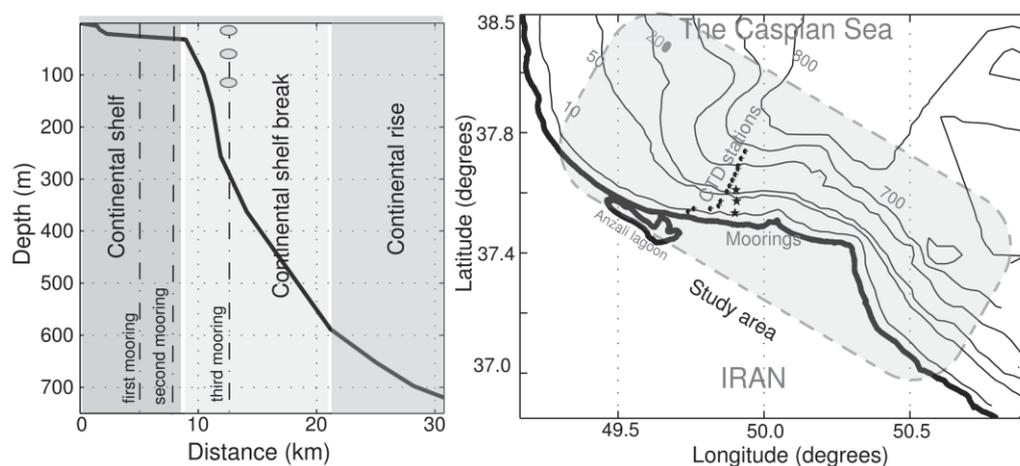


Рис.1. Схема размещения измерительного оборудования на фоне батиметрии исследуемого района шельфа Каспийского моря [2]

Ранее автором в серии лабораторных экспериментов были подробно исследованы особенности распространения вынужденных нелинейных (уединенных) [3] и линейных (периодических) [4] внутренних волн в следе за погруженными телами различной формы. В частности, была доказана пространственная независимость распространения низших мод линейных вынужденных внутренних волн согласно их индивидуальным дисперсионным характеристикам.

Сравнение результатов контактных натуральных измерений волновых профилей [2] с данными радарного зондирования поля эвфотической глубины, отражающей заглуб-

ление пикноклина, на 24 ноября (рис. 2а) и на 2 декабря (рис. 2б) 2004 года, выявило существенность для формирования пространственной структуры поля внутренних волн малого изменения градиента температуры в сезонном пикноклине за несколько суток.

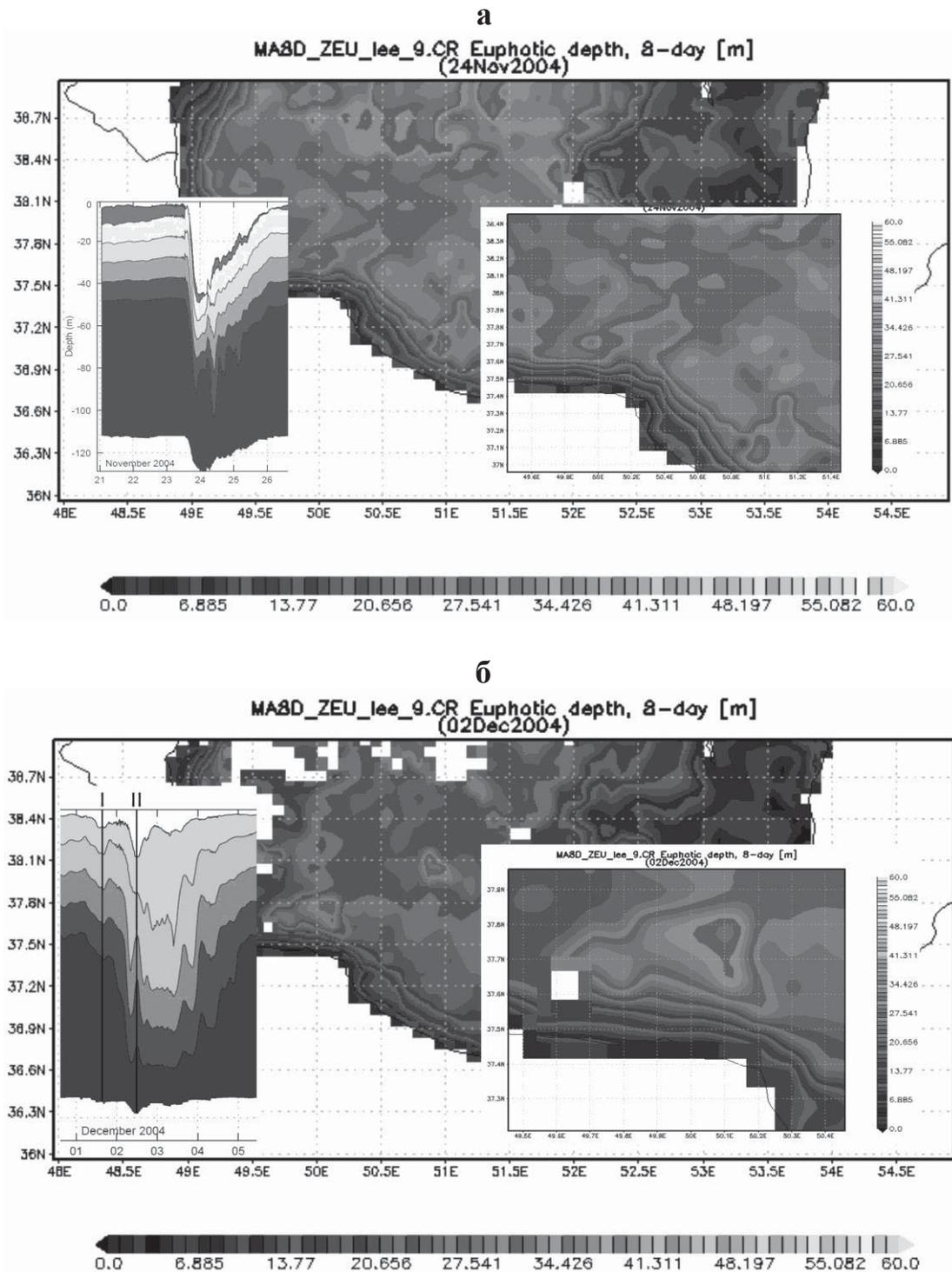


Рис. 2. Горизонтальная структура поля эвфотической глубины по данным радара MODIS-Aqua (исследуемая область увеличена на правой вставке) и вертикальная структура пикноклина по данным контактных изменений температуры (левая вставка [2]):

а – данные на 24 ноября 2004 г.; б – данные на 2 декабря 2004 г. (на левой вставке вертикальные линии соответствуют 1-й и 2-й моде внутренних волн)

Слабые изменения градиента температуры в приповерхностном пикноклине в осеннее-зимний период оказываются достаточными для формирования вблизи кромки шельфа нелинейных уединенных внутренних волн с практически вертикальным передним фронтом амплитудой более 40 метров в исследуемой юго-западной части Каспийского моря.

Вертикальная структура внутренних волн в приближении «твердой крышки» описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2} - \alpha^2 \Psi + \frac{N^2(\xi)}{\tilde{\omega}^2} \Psi = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями для собственных функций Ψ на поверхности $\xi = \xi_u$ и дне $\xi = \xi_d$:

$$\Psi(\xi_u) = \Psi(\xi_d) = 0. \quad (2)$$

Профиль частоты плавучести $N^2(\xi)$ в (1) аппроксимируется по экспериментальным замерам вертикального профиля температуры (плотности).

Для определения дисперсионных характеристик внутренних волн решается граничная задача (1) – (2) на собственные числа и собственные функции. При этом решение уравнения (1) представляется в виде суперпозиции двух линейно независимых функций:

$$\Psi(\xi) = A\varphi_1(\xi) + B\varphi_2(\xi), \quad (3)$$

где $\varphi_1(\xi)$ и $\varphi_2(\xi)$ - решения уравнения (3) при $\varphi_1(0) = 1, \varphi_1'(0) = 0$; $\varphi_2(0) = 0, \varphi_2'(0) = 1$.

Из уравнения (3) при граничных условиях (2) получается линейная однородная система для коэффициентов A и B :

$$\begin{aligned} A\varphi_1(\xi_u) + B\varphi_2(\xi_u) &= 0, \\ A\varphi_1(\xi_d) + B\varphi_2(\xi_d) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Из равенства нулю детерминанта этой системы

$$\varphi_1(\xi_u)\varphi_2(\xi_d) - \varphi_1(\xi_d)\varphi_2(\xi_u) = 0 \quad (5)$$

при фиксированных значениях частоты волны ω («метод стрельбы») численно определяются дисперсионные характеристики внутренних волн.

Линейный характер наблюдаемых внутренних волн в зимний период подтверждается противоположностью фаз 1-й и 2-й моды на эвфотической глубине согласно их вертикальной структуре в пределах пикноклина (вставка слева на рис. 3б), а также их пространственной независимостью (рис. 2б и 3б).

Приведенный в Таблице 1 расчет длин 1-й и 2-й мод внутренних волн по фазовым скоростям $C_{1,2}$ и натурным замерам периодов $T_{1,2}$ (левые вставки на рис. 2 а, б [2]) в два раза превышает параметры длин волн 1-й и 2-й моды, полученные по спутниковым данным для эвфотической глубины в том же районе шельфа (правые вставки на рис. 2 а, б).

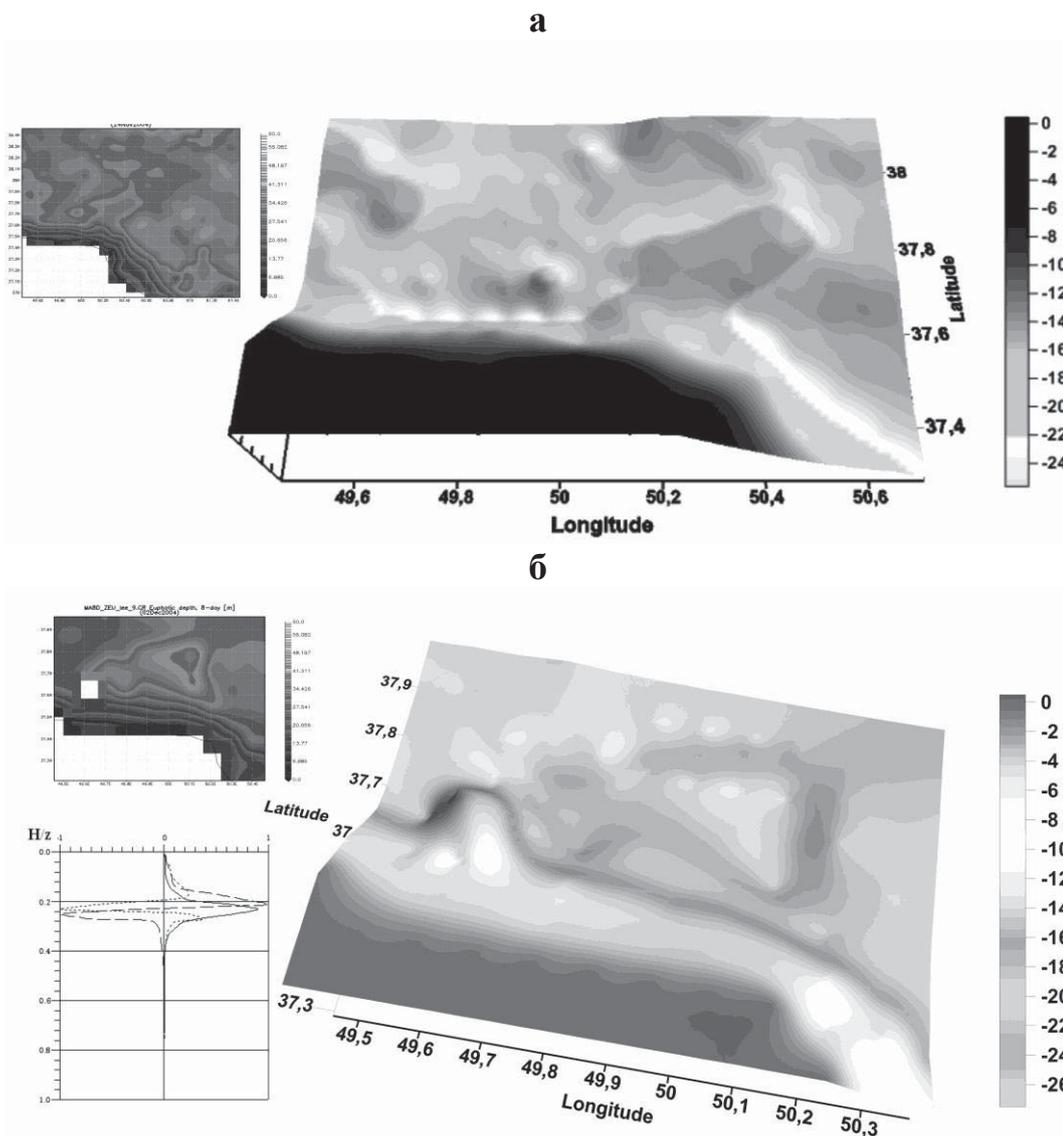


Рис. 3. Реконструкция пространственного распределения эвфотической глубины в исследуемой акватории по данным спутника MODIS-Aqua:

а – на 24 ноября 2004 г.; б – на 2 декабря 2004 г. в сравнении с вертикальной структурой мод внутренних волн в пикноклине: --- – 1 мода; - - - - - – 2 мода; - - - - - – 3 мода

Таблица 1

Оценка параметров линейных внутренних волн по данным контактных замеров и дистанционному зондированию в районе исследования 2 декабря 2004 года

	Натурные данные (Weber & Gaffari [2])	Спутниковые данные
Длина волны 1-й моды λ_1	$C_1 * T_1 = 1,2 \text{ м/с} * 12 \text{ ч} * 3600 \text{ с} = 51,48 \text{ км}$	$\cos 37,7^\circ * 111,111 * 0,3^\circ = 26,374 \text{ км}$
Длина волны 2-й моды λ_2	$C_2 * T_2 = 0,45 \text{ м/с} * 36 \text{ ч} * 3600 \text{ с} = 58,32 \text{ км}$	$\cos 37,78^\circ * 111,111 * 0,35^\circ = 30,737 \text{ км}$

Такое расхождение может объясняться неточностью выбора в статье [2] фиксированной частоты внутренних волн $\omega = N_{\max}$ для расчета параметров внутренней моды «методом стрельбы» по вертикальному профилю температуры (плотности) в месте расположения датчиков на шельфе.

Проведенные автором лабораторные эксперименты показали, что максимум спектра вынужденных внутренних волн смещен в сторону значений $\frac{1}{2}N_{\max}$ [5]. Соответствующие значения фазовых скоростей исследуемых мод $C_{1,2} \sim \frac{1}{2} N_{\max}$ также будут вдвое меньше.

Полученные результаты могут быть использованы для пространственно-временных оценок гидрологии по результатам контактных натурных измерений, а также для расшифровки данных дистанционного зондирования верхних слоев морской среды при комплексном моделировании гидродинамических особенностей в местах эксплуатации морского оборудования.

Реконструкция полей гидрологических параметров акватории Каспийского моря выполнена на основе спутниковых данных программы MODIS с помощью интерактивной системы визуализации спутниковых данных GIOVANNI.

Литература

1. **Khimchenko E., Serebryany A.** Mode-2 internal waves: observations in the non-tidal sea. 8-th International Symposium on Stratified Flows. 29 Aug. – 1 Sep. 2016, San Diego. USA.
2. **Weber J. E. H. and Ghaffari P.** Mass transport in internal coastal Kelvin waves. *Eur. J. Mech. - B/Fluid*, 2014, V. 47, 151-157. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2014.02.006.
3. **Shishkina O. D.** Resonant generation of solitary wave in thermocline. *Experiments in fluids*. 1996. V. 21, Iss. 5, P. 374–379. DOI: 10.1007/BF00189058.
4. **Шишкина О. Д.** Экспериментальное исследование генерации внутренних волн вертикальным цилиндром в приповерхностном пикноклине. *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2002. № 6, С. 94–99. DOI: 10.1023/A:1022356531179.
5. **Shishkina O. D.** Experimental study of regular background and ship internal waves interaction in the thermocline. 4-th International Symposium on Stratified Flows. Preprints. Eds. Hopfinger E., Voisin B. 1994, LEGI-IMG. Grenoble. V.3, Section GP3.