

ПРОВ 2010

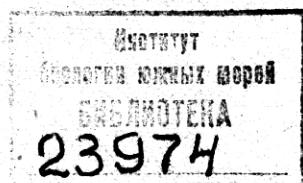
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР

Орден Трудового Красного Знамени

Институт биологии южных морей им. А.О.Ковалевского

ПРОВ 98

ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ТУНИССКОМ ПРОЛИВЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКОВА ДУМКА»
КИЕВ—1971

ПРОЦЕССЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО ОБМЕНА В ТУНИССКОМ ПРОЛИВЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ

Сложность рельефа дна в Тунисском проливе и преобладание повышенной ветровой деятельности над морем в зимнее время в период исследований нис "Академик А.Ковалевский" создают благоприятные условия для интенсивного турбулентного обмена. На значительные колебания температуры, солености, скорости течений по вертикали и по времени, существование инверсий указывали французские океанографы, которые исследовали Тунисский пролив в апреле 1963 г. Всю совокупность колебаний океанографических параметров П.Фразетто (1965) относит к случайным процессам. Наблюдения за дрейфом буйков с парашютами, опущенными на разные глубины, показали существование вихрей различных диаметров: от одной до пяти миль.

Учитывая большую динамичность процессов, происходящих в районе Тунисского пролива, особенно в зимнее штормовое время, представляет существенный интерес количественно оценить интенсивность турбулентного горизонтального и вертикального обмена.

Как известно, для изучения характеристик горизонтального турбулентного обмена количеством движения в низкочастотной области спектра вполне пригодны измерения течений самописцами типа БПВ на многосуточных автономных буйковых станциях. Последние могут регистрировать скорость в продолжение длительного времени с интервалами отпечатков в 5, 10, 15, 20 и 30 мин. Такая дискретность не позволяет уловить высокочастотные составляющие спектра вихрей, но хорошо отражает среднемасштабные и крупные вихри.

В январе-феврале 1970 г. в узкой части Тунисского пролива на пяти автономных буйковых станциях были получены двух-трехсуточные ряды дискретных скоростей течения с интервалом 10 мин. На трех станциях (АБС 2, 5 и 6) наблюдениями были одновременно охвачены поверхностные, промежуточные и глубинные слои моря. В общей сложности

получены относительно длительные ряды по течению на 18 горизонтах, что впервые позволяет наиболее полно характеризовать поле течений в проливе.

Многие исследователи показали, что поля пульсаций скорости относительно осредненных значений, наблюдаемые в морях и океанах, носят случайный характер, подчиняющийся нормальному закону распределения Гаусса (Штокман, 1940, 1941; Хлопов, 1958; Гезенцвей, 1959, 1961; Озмидов, 1961, 1968). Не прибегая к доказательствам, предполагалось, что поле пульсаций скорости, наблюдаемое в Тунисском проливе, также подчиняется нормальному закону распределения прерывной случайной величины. Поэтому полученные ряды дискретных скоростей течения были обработаны с использованием тензорной теории турбулентности, в которой поле мгновенных скоростей рассматривается как результат наложения поля пульсаций вектора скорости (u' и v') на поле осредненных скоростей потока ($\bar{u}$ и $\bar{v}$).

Для того, чтобы проследить за вкладом вихрей разных масштабов в процесс горизонтального перемещения, проводилось сглаживание наблюдаемых мгновенных значений составляющих скорости по периодам: 40 мин., 1, 2, 4, 6, 12 и 24 часа. Сглаживание рядов составляющих скорости $u(t)$ и $v(t)$ проводилось с использованием выражения

$$\bar{u}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) \cdot k(\tau) d(\tau). \quad (1)$$

$k(\tau)$ является аналитическим фильтром, которым пользовался Р.В.Озмидов в своей работе (1968). Этот фильтр имеет следующий вид:

$$k(\tau) = \begin{cases} \frac{1 + \cos \omega_0 \tau}{T_0}, & -\frac{\pi}{\omega_0} \leq \tau \leq \frac{\pi}{\omega_0}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \\ 0, & |\tau| > \frac{\pi}{\omega_0} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь ω_0 - угловая скорость; T_0 - период сглаживания, τ - временной интервал любой дискретной скорости от начальной ($\tau = n \cdot \Delta t$, где n - порядковый номер отпечатка, Δt - время между отпечатками).

Пропуская наблюдаемый ряд составляющих скорости через данный фильтр, исключаются колебания скорости, связанные с вихрями, меньшими заданного периода сглаживания (T_0). При этом предполагается, что все составляющие с периодом $T > T_0$ можно отнести к закономерным изменениям осредненной скорости, а более высокочастотные изменения $u(t)$ рассматриваются как турбулентные пульсации.

Пульсационные скорости получались вычитанием из наблюдаемого ряда скоростей, сглаженного по задаваемым периодам

$$u(t) - \bar{u}(t) = u'(t).$$

Полученные таким путем пульсации скорости обусловлены участком спектра беспорядочных разномасштабных вихрей от интервала отпечатков до периода сглаживания. При увеличении периода сглаживания дискретного ряда скоростей спектр вихрей, определяющий величины пульсационных скоростей, соответственно расширяется. При сглаживании по периоду 40 мин пульсационные скорости определяются набором наиболее высокочастотных вихрей с временным масштабом от 10 до 40 мин. При периоде сглаживания в 24 часа пульсационные скорости определяются широким диапазоном вихрей от периода в 10 мин до одних суток.

Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена количеством движения вычислялись по методу Эртеля (1937). Они рассматривались Эртелем в качестве векторных величин, которые являются составляющими тензора турбулентного обмена, и характеризовались шестью компонентами:

$$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}, \epsilon_{zx} = \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz} = \epsilon_{zy},$$

Для расчета коэффициентов горизонтального турбулентного обмена использовались три из них: в направлении параллели (вдоль оси X) $\lambda_x = \rho \overline{v' l'_x}$ (3) в направлении меридиана (вдоль оси Y)

$$\lambda_y = \rho \overline{u' l'_y} \quad (4) \text{ и два симметричных относительно главной диагонали тензора обмена}$$

$$\lambda_{xy} = \rho \overline{u' l'_x} = \lambda_{yx} = \rho \overline{v' l'_y},$$

где ρ — плотность воды, которая принималась равной единице; v' и u' — пульсационные компоненты вектора скорости; l'_x и l'_y — компоненты пути смещения молярных масс жидкости в духе Прайдтля. Последние вычислялись по формуле Леттау

$$l'_x = \int_0^t v' dt, \quad l'_y = \int_0^t u' dt,$$

где t — промежуток времени, в продолжение которого сохраняется знак пульсационной скорости. Приближенное выражение интеграла пути смещения имеет вид $l'_x = \Delta t \sum v'$,

$L_y = \Delta t \sum_i^n u' \Delta t$. Здесь Δt - интервал времени между соседними величинами пульсационных скоростей (в нашем случае это 10 мин), n - число членов пульсационных скоростей в группе данного знака.

Пульсационные скорости вычислялись как отклонения наблюдаемой скорости от сглаженной по заданному периоду. Последние группировались по знаку временной последовательности. Число членов в каждой группе - n , число групп - M . Путь смещения отождествлялся с расстоянием, на которое перемещается "вихрь" за время $n \cdot \Delta t$. Определяется L_x и L_y как произведение сумм пульсационных скоростей данного знака на интервал времени между отпечатками. Значение тензора турбулентного вихря для каждой группы можно записать в виде

$$\overline{v' L_x} = \frac{\Delta t}{n} \sum_i^n (v' \sum_j^n v') = \Delta t \frac{(\sum v')^2}{n}$$

$$\overline{u' L_y} = \frac{\Delta t}{n} \sum_i^n (u' \sum_j^n u') = \Delta t \frac{(\sum u')^2}{n} \dots \quad (6)$$

Среднее значение компоненты тензора турбулентности из всех групп и дает величину коэффициента турбулентного обмена в направлении меридиана и параллели

$$A_\lambda = \frac{\Delta t \sum_i^n \left(\frac{1}{2} r' \right)^2}{n}, \quad A_\varphi = \frac{\Delta t \sum_i^n \left(\frac{\Delta t \sum_j^n u'}{n} \right)^2}{n}$$

$$A_{\lambda\varphi} = \frac{\Delta t \sum_i^n \frac{1}{2} r' \cdot \sum_j^n u'}{n}, \quad A_{\varphi\lambda} = \frac{\Delta t \sum_i^n \frac{1}{2} r' \cdot \sum_j^n u'}{n}.$$

Эти формулы и были использованы для расчета коэффициентов горизонтального турбулентного обмена количеством движения при разных периодах сглаживания. Расчеты выполнялись на ЭВМ Минск-22 в Одесском гидрометеорологическом институте под руководством старшего научного сотрудника В.А. Шнайдемана. Величины коэффициентов горизонтального турбулентного обмена вдоль параллели (A_λ) и меридиана (A_φ) не отражают экстремальных значений параметров обмена. Для их получения строят эллипсы турбулентного обмена, уравнения которых, если центр совместить с началом декартовой системы координат, ось X направить вдоль параллели и ось Y вдоль меридиана, имеют вид

$$A_x x^2 + 2A_{xy} xy + A_y y^2 = 1. \quad (8)$$

При построении эллипсов обмена удобно уравнение (8) привести к каноническому виду. Для этого нужно повернуть ось X против часовой стрелки на угол α . Последний определяется по уравнению

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2A_{xy}}{A_x - A_y}. \quad (9)$$

Новое направление осей соответствует экстремальным значениям коэффициентов обмена. Уравнение эллипсов обмена в канонической форме, отнесенное к осям X и Y, запишем в виде

$$\frac{x^2}{A'_x} + \frac{y^2}{A'_y} = 1. \quad (10)$$

Коэффициенты A'_x и A'_y являются корнями квадратного уравнения

$$\lambda^2 - (A_y + A_x)\lambda + (A_y \cdot A_x - A_{xy}^2) = 0. \quad (11)$$

Полуоси эллипса обмена в новой системе координат определяются по формулам

$$a_{x'}^2 = \frac{1}{A'_x}; \quad b_{y'}^2 = \frac{1}{A'_y}. \quad (12)$$

В табл. 3 приведены экстремальные значения горизонтальных коэффициентов турбулентного обмена в узкой части Тунисского пролива. На всех станциях коэффициенты горизонтального турбулентного обмена количеством движения растут с расширением спектра вихрей, формирующих поле пульсационных скоростей (т.е. с увеличением периода сглаживания). При выделении относительно высокочастотной части спектра вихрей (от 40 мин до 3 час) происходит наиболее быстрое увеличение коэффициентов обмена (рис. 10). При дальнейшем расширении спектра вихрей, определяющих величины пульсационных скоростей, коэффициенты горизонтального обмена увеличиваются плавно. Характер изменения $A_{x'}$ и $A_{y'}$ как функции периода сглаживания зависит от скорости течения и состояния поверхности моря. При сильном ветре и волнении отмечается наибольшее увеличение коэффициентов турбулентного обмена при расширении высокочастотного участка спектра вихрей (10–40 мин; 10 мин – 2 часа) в верхнем слое (горизонт 10 м, АБС 2,

Таблица 3

Экстремальные значения коэффициентов горизонтального турбулентного обмена количеством движения ($\text{см}^2/\text{сек}$) в Тунисском проливе

№ АБС, дата наби- глубина (м) ст.	Период осредн T_0	$A_x \cdot 10^4$					$A_y \cdot 10^4$				
		Горизонты					Горизонты				
		10	25	50	200	350	10	25	50	200	350
1 15-18.1 H=418	40 мин	24,66	11,85	8,24	1,00	-	16,18	6,43	6,57	0,367	-
	1 час	38,84	18,72	13,89	1,64	-	28,40	11,13	11,93	0,591	-
	2 "	57,23	29,00	20,68	2,59	-	43,16	18,57	19,20	0,860	-
	4 "	71,43	32,82	25,58	3,66	-	53,33	23,21	24,54	1,130	-
	6 "	71,00	34,48	28,29	3,90	-	57,69	23,86	25,37	1,240	-
	12 "	84,51	40,04	32,04	3,77	-	65,18	24,18	27,73	-	-
	24 "	123,19	68,03	42,54	5,68	-	73,07	27,52	33,86	-	-
Число наблюдений		398	400	399	399						
2 19-20.1 H=436	40 мин	19,85	15,12	4,32	0,49	6,49	3,02	1,32	0,45	0,29	3,85
	1 час	56,31	24,34	7,59	0,91	9,36	4,96	1,99	0,58	0,53	3,36
	2 "	67,78	35,86	12,50	1,60	14,74	5,08	2,98	0,96	0,93	5,73
	4 "	83,94	40,10	15,18	1,89	17,58	5,66	3,57	1,51	1,37	7,76
	6 "	91,76	46,65	16,18	2,69	17,04	7,59	4,24	1,38	1,75	7,43
	12 "	101,46	52,14	19,88	5,38	24,81	9,97	4,34	1,80	2,47	-
Число наблюдений		169	168	167	171	169					

Продолжение таблицы 3

№ АБС дата набл. глубина (м) ст.	T ₀	A _x · 10 ⁴				A _y · 10 ⁴			
		Горизонты				Горизонты			
		10	25	50	150	10	25	50	150
4 25-28.1 H=235	40 мин	8,02	-	1,68	0,45	3,19	-	0,21	0,28
	1 час	13,16	-	2,81	0,67	5,76	-	0,32	0,48
	2 "	20,25	-	4,21	1,31	10,20	-	0,53	0,87
	4 "	25,28	-	5,33	3,86	13,50	-	0,71	3,40
	6 "	26,22	-	5,84	19,84	15,26	-	0,89	7,59
	12 "	31,35	-	6,94	20,92	20,92	-	2,34	23,76
	24 "	50,06	-	10,52	-	28,62	-	9,09	-
Число наблюдений		440		440	144				
	T ₀	10	50	100	150	10	50	100	150
5 30-31.1 H=170	40 мин	7,73	2,51	0,89	1,55	7,53	0,90	0,28	0,86
	1 час	13,79	5,03	1,38	2,42	13,16	1,62	0,49	1,58
	2 "	22,97	8,74	2,55	3,64	18,03	3,18	0,70	3,11
	4 "	28,84	11,06	3,92	5,43	20,68	3,72	1,14	4,48
	6 "	31,13	14,06	5,60	6,63	19,49	4,54	1,46	-
	12 "	35,41	14,18	12,16	9,92	26,11	5,00	1,48	-
Число наблюдений		137	138	138	137				

№ АБС, дата наблюд. глубина (м) ст.	T ₀	A _x · 10 ⁴			A _y · 10 ⁴		
		Горизонты			Горизонты		
		25	50	90	25	50	90
6	40 мин	1,15	0,59	3,96	0,99	0,37	1,14
5-7.П	1 час	1,98	0,98	6,87	1,76	0,66	2,10
H-95	2 "	3,04	1,74	11,27	2,77	1,07	4,42
	4 "	4,45	3,17	15,60	3,73	2,52	6,16
	6 "	6,11	6,44	19,56	4,24	4,37	9,14
	12 "	20,61	61,90	59,45	8,44	18,49	26,68
	24 "	96,75	557,3	314,7	32,49	89,56	127,90
Число наблюдений		304	304	295			

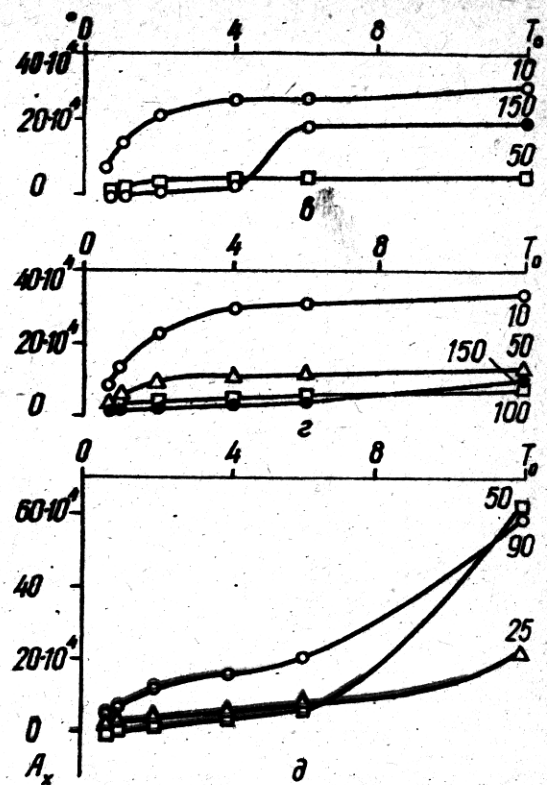
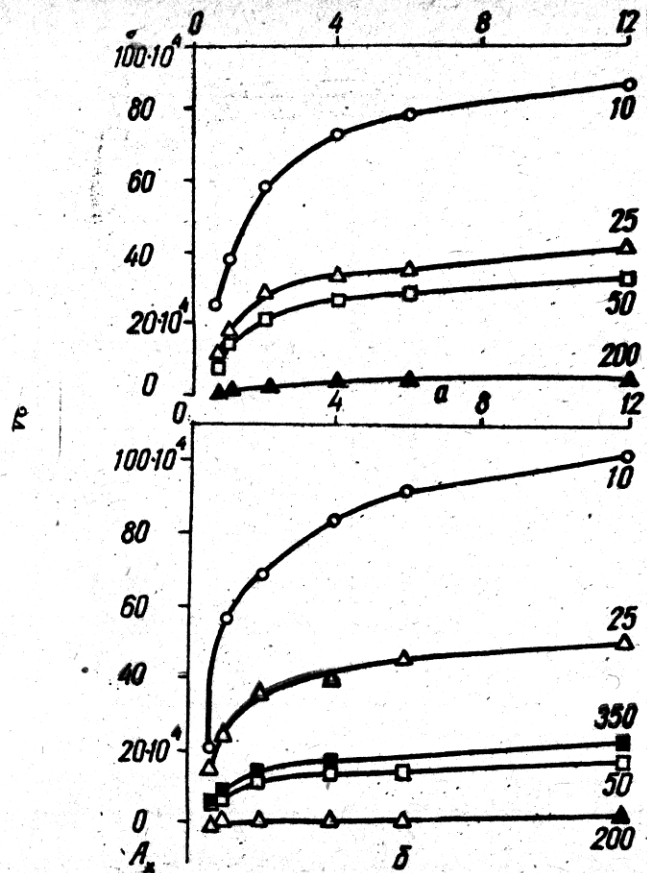


Рис. 10. Кривые изменения A_x и A_y от перепада осреднения.

рис. 10в). С глубиной кривая $A_x = f(l_0)$ увеличивается на том же участке спектра вихрей плавнее. При дальнейшем расширении спектра вихрей, формирующих поле пульсаций до 6, 12 и 24 час, коэффициенты горизонтального турбулентного обмена увеличиваются весьма плавно и по закону, близкому к линейному.

В штилевую погоду (АБС 6) коэффициенты горизонтального турбулентного обмена изменяются плавно при расширении периода сглаживания от 40 мин до 6 час (рис. 10, д). В районах, где заметна приливная составляющая течения, происходит резкое увеличение коэффициентов обмена при сглаживании ряда по периодам 12 и 24 часа. В этом случае поле пульсационных скоростей в значительной степени формируется приливной составляющей течения, когда статистическая теория турбулентности не применима для вычисления коэффициентов турбулентного обмена. Такое увеличение коэффициентов при сглаживании по периодам 12 и 24 часа отмечалось на мелководной северной станции (АБС 6), где прослеживалась приливная волна суточного периода. Эти величины A_x и A_y , хотя и приведены в табл. 4, однако они ставятся под сомнение.

Максимальные значения A_x и A_y (от $1,95 \cdot 10^5$ до $1,23 \cdot 10^6$ для A_x и от $0,30 \cdot 10^5$ до $7,31 \cdot 10^5$ для A_y) отмечались в районе глубинных станций (АБС 1 и 2) в верхнем слое на глубине 10 м. Наблюдения на этих станциях выполнялись при сильных ветрах западной четверти, достигающих шторма. Минимальные значения коэффициентов турбулентного обмена в верхнем слое отмечались в северном мелководном районе пролива, где наблюдения проводились в штилевую погоду. Здесь значения A_x и A_y были на один-полтора порядка меньше по сравнению с южным районом. В этом районе пролива наиболее интенсивное турбулентное перемешивание отмечалось в глубинном слое (на 80 м при глубине станции 95 м), где A_x и A_y имели максимальные значения ($1,96 \cdot 10^5$ и $0,91 \cdot 10^5$ см²/сек). []

Для сравнения в табл. 4 приводятся значения коэффициентов горизонтального турбулентного обмена для северного района Тунисского пролива и прибофорского района Черного моря. На обеих станциях наблюдения проводились в зимнее время в штилевую погоду, которая установилась на

Таблица 4

Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена в мелководных районах Тунисского пролива и прибофторского района Черного моря по наблюдениям над течением в зиму 1970 г. в штилевую погоду ($\text{см}^2/\text{сек}$)

Количество отпечатков	Глубина Станции	Период сглажи- вания	25		50		85	
			$A_x \cdot 10^4$	$A_y \cdot 10^4$	$A_x \cdot 10^4$	$A_y \cdot 10^4$	$A_x \cdot 10^4$	$A_x \cdot 10^4$
5-7.П.1970 г. Тунисский пролив, АБС 6, северный мелководный район								
392	85	40 мин	1,15	0,986	0,591	0,373	3,96	1,15
		1 час	1,99	1,76	0,982	0,657	6,87	2,10
		2 "	3,04	2,77	1,740	1,070	11,30	4,42
		4 "	4,45	3,73	3,170	2,250	15,60	6,16
		6 "	6,11	4,24	6,440	4,730	19,50	9,14
5-7.Ш.1970 г. Прибосфорский район Черного моря, АБС 7								
339	92	40 мин	0,547	0,165	-	-	0,084	0,056
		1 час	0,977	0,257	-	-	0,14	0,103
		2 "	1,47	0,373	0,582	0,201	0,318	0,241
		4 "	1,97	0,527	0,825	0,289	0,815	0,591
		6 "	2,29	0,640	1,110	0,421	1,57	1,180

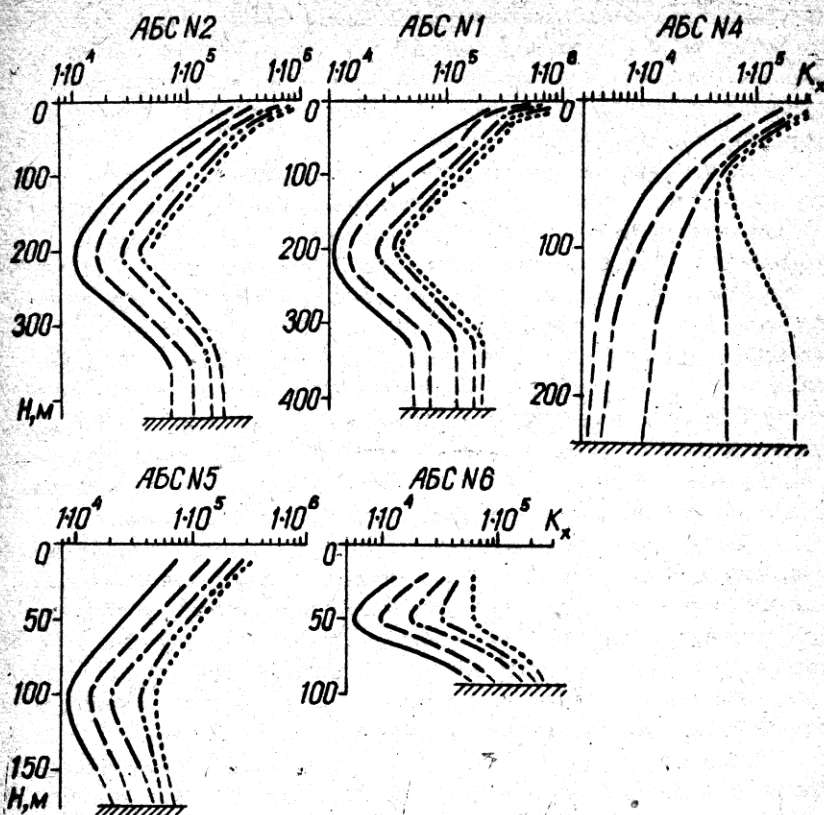


Рис. 11. Изменение по вертикали коэффициентов горизонтального обмена

короткое время в период смены ветровых полей. Продолжительность наблюдения, интервал отпечатков, методика вычисления пульсационных скоростей и периоды сглаживания наблюдаемого ряда скоростей были совершенно одинаковы в обоих случаях.

Процесс горизонтального турбулентного обмена в Тунисском проливе был более интенсивным по сравнению с прибосфорским районом Черного моря. В верхнем слое (25 м) коэффициенты обмена по величине были в 2-3 раза больше, чем в прибосфорском районе. С глубиной интенсивность турбулентного обмена в Тунисском проливе увеличивается

по сравнению с прибофорским районом еще больше. Так, в промежуточном слое горизонтальный турбулентный обмен в 3-5 раз больше, а в придонном слое - на 1,5-2 порядка превышает обмен на соответствующих горизонтах в прибофорском районе Черного моря.

Изменение интенсивности горизонтального турбулентного обмена по вертикали представлено на рис. 11. В отличие от характерного для открытых районов морей и океанов убывания процессов горизонтального турбулентного обмена с глубиной (Штокман, 1940; Гезенцвей, 1964) в Тунисском проливе на всех станциях отмечается уменьшение горизонтального турбулентного обмена в промежуточном слое. В зависимости от глубины места меняется расположение промежуточного минимума коэффициентов горизонтального обмена от 350 м на АБС 2 до 50 м на АБС 6. В слое минимума обмена величины A_x и A_y уменьшались на один-полтора порядка по сравнению с верхним и нижележащим слоем.

Затухание горизонтального турбулентного обмена в промежуточном слое связано с особенностями течения в Тунисском проливе. Как показали наши наблюдения, остаточное течение в проливе двухслойное разнонаправленное. При таком характере течений создается промежуточный переходный слой с затуханием остаточной составляющей течения и ослаблением горизонтального турбулентного обмена.

Процесс турбулентного обмена в проливе носит анизотропный характер, но не ярко выраженный. На большинстве горизонтов малая полуось эллипса обмена меньше большой в 1,06 - 1,63 раза, за исключением горизонтов 200 м на АБС 1, 50 м - на АБС 4 и 25 м - на АБС 2, где соотношение большой полуоси к малой составляло 1,95-3,27. Эллипсы обмена приводятся для трех слоев: верхнего, промежуточного, где отмечается затухание горизонтального турбулентного обмена, и глубинного (рис. 12а, б, в). Построены они по коэффициентам, вычисленным при сглаживании дискретного ряда скорости по шестичасовому периоду. Эллипсы обмена наглядно показывают характер и интенсивность развития горизонтального турбулентного обмена для разных участков пролива. Поскольку A_x и A_y обратно пропорциональны квадрату полуосей эллипса обмена, то малая полуось указывает направление наиболее интенсивного горизонтального турбу-

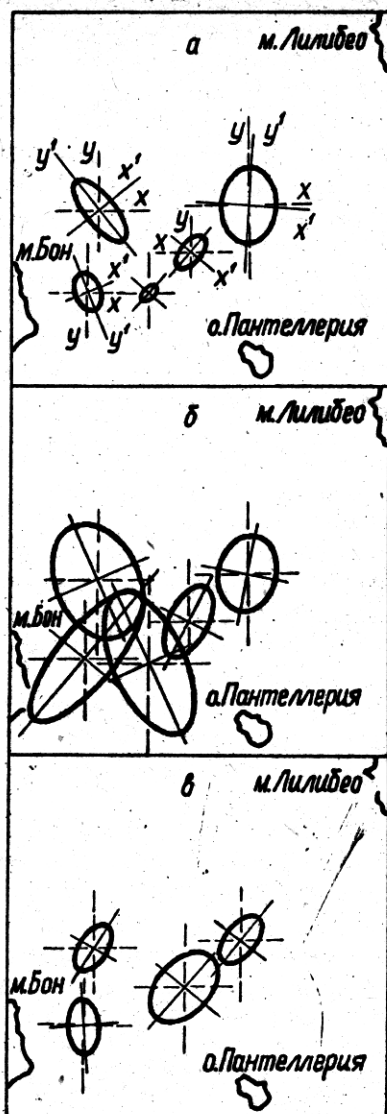


Рис.12.. Эллипсы горизонтального обмена: а - в верхнем слое (10-25 м); б - в промежуточном слое, где отмечается затухание обмена; в - в нижнем слое

лентного обмена, большая — направление минимального обмена. При одинаковом масштабе построения эллипсов обмена большие размеры их соответствуют относительно слабому развитию процессов турбулентного обмена, наоборот, малые размеры эллипсов указывают на более интенсивный обмен. Таким образом, эллипсы обмена дают наглядное представление о структуре процесса горизонтальной турбулентности в Тунисском проливе. В верхнем и глубинном слоях турбулентный обмен более интенсивен и по величине примерно одного порядка. В промежуточном слое обмен по всей ширине пролива ослабевает. Поскольку вертушки подвешивались редко, то нет уверенности, что точно захвачены слои с максимальными и минимальными значениями коэффициентов турбулентного обмена.

Ориентация эллипсов указывает, что наиболее интенсивный обмен отмечался в направлении преобладающего течения (запад-северо-запад — восток-юго-восток).

Кроме оценки процессов горизонтального турбулентного обмена в Тунисском проливе, представляет интерес определить интенсивность вертикального турбулентного обмена количеством движения и изменения его по вертикали.

Количественно процесс вертикальной турбулентности определяется потоком кинетической энергии от среднего движения к пульсационному, который определяется, как работа сил турбулентных касательных напряжений. В стратифицированном море этот поток энергии расходуется на работу против сил Архимеда и на диссипацию кинетической энергии в тепло. Кроме того, через границы рассматриваемого слоя проходит диффузионный поток кинетической энергии турбулентности. Указанные источники и стоки кинетической энергии и определяют баланс энергии турбулентности. Количественно указанные соотношения выражаются уравнением кинетической энергии турбулентности (Шнайдман, 1969), которое имеет вид

$$\kappa \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] - \alpha \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \alpha \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) - \alpha \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho^2}{\rho} \right) = \frac{d\epsilon}{dt}.$$

Это уравнение и использовалось для исследования вертикальной турбулентности в Тунисском проливе. Здесь κ — коэффициент турбулентной вязкости, u и v — горизонтальные составляющие скорости течения, ρ — плотность, ϵ —

- интенсивность турбулентности, выражаемая через пульсации скорости

$$\delta = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2}$$

α_ρ - отношение коэффициента обмена для плотности к коэффициенту вязкости, примерно равное 0,1; α_δ - отношение коэффициента обмена для кинетической энергии турбулентности к коэффициенту вязкости, равное, по данным измерений в трубах, 0,73; α_ϵ - константа в выражении для диссипации кинетической энергии в тепло, равная, по данным Кенана и Утиной, $\alpha_\epsilon \approx 0,05 - 0,1$.

Компоненты скорости u и v и значения плотности получены по непосредственным наблюдениям на суточных станциях в Тунисском проливе в январе-феврале 1970 г.

Характерный размер вихря задавался выражением

$$L = a(\epsilon + h) \left(1 - \frac{\epsilon}{N}\right) \left(1 - \frac{h}{h_{cr}}\right),$$

где a - эмпирический коэффициент, принятый равным 0,02; h - высота волны в момент наблюдения; N - глубина моря.

Граничные условия задачи: 1) на поверхности и у дна задаются тангенциальные напряжения трения и интенсивность турбулентности

$$\text{при } z = 0, \quad k \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x; \quad k \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y$$

$$\text{при } z = H, \quad k \frac{\partial u}{\partial z} = k \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \delta = 0.$$

Коэффициенты вертикального турбулентного обмена количеством движения в настоящее время вычислены для одной суточной станции (сут. ст. 24 у АБС-2) по четырем срокам наблюдений: 13, 15, 17 и 19 час. Как указывалось ранее, для Тунисского пролива характерна значительная изменчивость в вертикальном распределении термохалинных характеристик, скорости течения, положения и толщины промежуточного слоя смешения атлантических вод с левантийскими. Вид профиля коэффициента вертикального турбулентного обмена в течение суток также существенно менялся. Градиенты плотности и скорости течения оказывают взаимно противоположное воздействие на зарождение и развитие турбулентных вихрей с горизонтальной осью вращения. Пер-

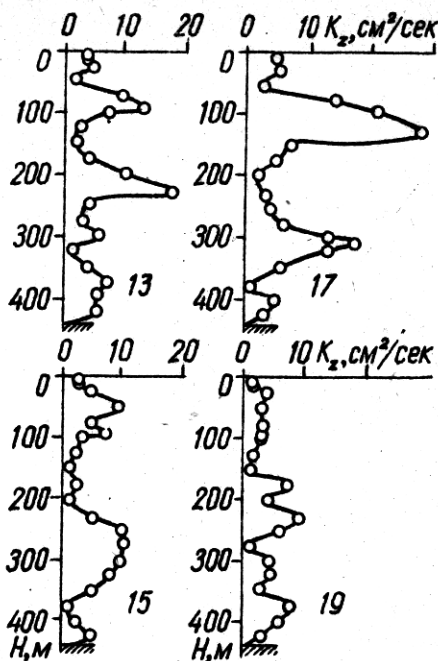


Рис. 13. Изменение по вертикали коэффициентов вертикального турбулентного обмена количеством движений по наблюдениям на ст. 24

вые быстро гасят зарождающиеся вихри, вторые, наоборот, способствуют их развитию. На рис.13 представлены профили коэффициентов вертикального турбулентного обмена количеством движения. В течение суток меняются как максимальные значения коэффициентов вертикального обмена, так и положение максимумов и минимумов. В отдельные сроки на профилях четко выделяются два слоя с максимальными значениями K_z (в 13 и 17 часов); они приходятся на слои с минимальной устойчивостью и соответствуют примерно середине слоя атлантических и левантийских вод. Абсолютные значения K_z изменялись в пределах от 1,81 до 28,62 $\text{см}^2/\text{сек}$.

З а к л ю ч е н и е

Впервые для района Тунисского пролива получены количественные характеристики процессов горизонтального и вертикального турбулентного обмена. Величины горизонтального турбулентного обмена в 10^4 – 10^5 раз больше вертикального обмена.

В отличие от открытых районов моря распределение горизонтального турбулентного обмена по вертикали характеризуется наличием минимума в промежуточном слое.

Профиль вертикального коэффициента турбулентного обмена характеризуется двумя максимумами, совпадающими примерно с серединой слоя атлантической и левантийской вод.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЛЕВАНТИЙСКИХ ВОД ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НИС «АКАДЕМИК А. КОВАЛЕВСКИЙ»

Вертикальный и горизонтальный обмен и особенности формирования промежуточных и глубинных вод Средиземного моря представляют общий океанографический интерес.

Для изучения процессов конвекционного перемешивания и особенностей формирования промежуточных вод повышенной солености Средиземного моря наибольший интерес представляют зимние наблюдения. В этот период в северном и северо-восточном районах моря Леванта образуются промежуточные воды повышенной солености. Зимнее время характеризуется интенсивной ветровой деятельностью с преобладанием ветров западной четверти. Вероятно, в этот период происходит более интенсивная их адвекция с востока на запад.

Институт биологии южных морей АН УССР провел три экспедиции в холодное время года. В декабре-январе 1960–61 гг. исследования проводились в западной половине Средиземного моря, где сделано 22 гидрологических станции. В восточной половине моря работы проводились в феврале 1962 г., выполнено 26 станций. В январе-феврале 1970 г. подробно исследовался район Тунисского пролива, где сделано 30 гидрологических (из них несколько суточных) и 5 буйковых станций с наблюдением над течением (рис. 14).