

ОБ ОЦЕНКЕ МАСШТАБОВ ЯВЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НАД СКОРОСТЯМИ ТЕЧЕНИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ

В. И. Зап

(Институт биологии южных морей АН УССР)

В настоящее время при анализе горизонтального турбулентного обмена рассматривают целый спектр масштабов явления или характерных размеров элементов турбулентности. Знание масштабов явлений для различных турбулентных процессов позволяет обоснованно выбирать параметры турбулентности при решении тех или иных конкретных задач.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы на основе экспериментального исследования «ричардсоновской диффузии» [2] оценить пространственные масштабы явления для коэффициентов горизонтального обмена, вычисленных по пульсациям скоростей течений в Черном море различными авторами (по методу Эртеля).

Условно все разнообразие масштабов явлений можно подразделить на три большие группы, характеризующие следующие процессы горизонтальной турбулентности: микро-, мезо- и макротурбулентность.

Учитывая громадные горизонтальные размеры морей, следует под микротурбулентностью рассматривать горизонтальные процессы с масштабами явления в десятки и сотни метров — до 1 км, под мезотурбулентностью (или среднемасштабной турбулентностью) — процессы с масштабами явления порядка 1—10 км [5] и, наконец, под макротурбулентностью — процессы с масштабами явления в десятки и сотни километров вплоть до 1000 км. Так как принято считать, что наибольшие вихри в океане, обусловленные турбулентностью, должны быть меньше, чем океанические круговороты планетарного масштаба, то размеры крупномасштабных горизон-

тальных процессов до 1000 км вполне реальны и соответствуют наблюдаемым крупным вихрям в Гольфстриме и Курсио.

Естественно, что указанное подразделение условно, но оно полезно, так как позволяет упорядочить все имеющееся разнообразие в величинах коэффициентов обмена, относя их к определенным масштабам явления.

Исследования последних лет показали, что наблюдающееся разнообразие в величинах коэффициентов горизонтального обмена, помимо прочих факторов, объясняется различием в масштабах явления. Известный «закон 4/3» (закон Ричардсона — Обухова), устанавливающий зависимость коэффициентов горизонтального обмена от масштаба явления [4, 7], дал возможность более обоснованно выбирать коэффициенты турбулентности при решении ряда задач, в том числе и прикладных (например, в задачах о распределении концентрации примесей в море от различных источников сброса — мгновенных или непрерывных).

В работе [2] на основе экспериментов с дрейфующими поплавками в прибрежной зоне Южного Крыма было показано, что в узкой зоне шириной до 0,5—0,6 миль «закон 4/3» не всегда выполняется. Так, показатель степени n в формуле

$$K(l) = cl^n \quad (1)$$

($K(l)$ — коэффициент турбулентного обмена, l — масштаб явления, c — некоторая постоянная величина) оказался равным для района Ялты 0,4, что почти в три раза меньше, чем в «законе 4/3». Это получено в результате обработки свыше 30 пусков свободно плавающих поплавков в 1956—1962 гг. и осреднения около 1400 наблюдений. Лишь для отдельных пусков показатель степени n достигал величин 1,0—1,2.

Наблюдения над дрейфом свободно плавающих поплавков в этом районе в 1965 г. показали, что $n = 1,37$, т. е. в некоторых случаях «закон 4/3» выполняется в этой зоне.

Наблюдениями над дрейфующими поплавками в 2,5—5 милях от берега установлено, что с удалением от берега «закон 4/3» выполняется.

Мы пришли к выводу, что показатель степени n в формуле (1) является, вообще говоря, переменной величиной, значения которой лежат в интервале от 0, когда коэффициенты постоянны, до 4/3, когда появляются оптимальные условия для процессов горизонтальной турбулентной диффузии.

Таким образом, наблюдаемое отклонение от «закона 4/3» в узкой прибрежной зоне и то, что в 2,5—5,0 милях от берега этот закон оправдывается, свидетельствует о том, что с удалением от берега интенсивность горизонтальной диффузии существенно возрастает. Это возрастание хорошо прослеживается на рис. 1. Если для малых масштабов явления порядка 0—50, 50—100 м такого четкого роста

не обнаружено, то для масштабов явления 50—200, 100—200 200—300 м отмечается существенный рост коэффициентов обмена с удалением от берега. Например, из графика следует, что величина коэффициента диффузии в 500 м от берега (для масштаба явления 200—300 м) составляет $55 \cdot 10^2 \text{ см}^2/\text{сек}$, а в 5 км от берега достигает величины $150 \cdot 10^2 \text{ см}^2/\text{сек}$ — усиление обмена значительное.

Такой рост объясняется, возможно, тем, что с удалением от берега возрастают скорости течений и одновременно исчезают огра-

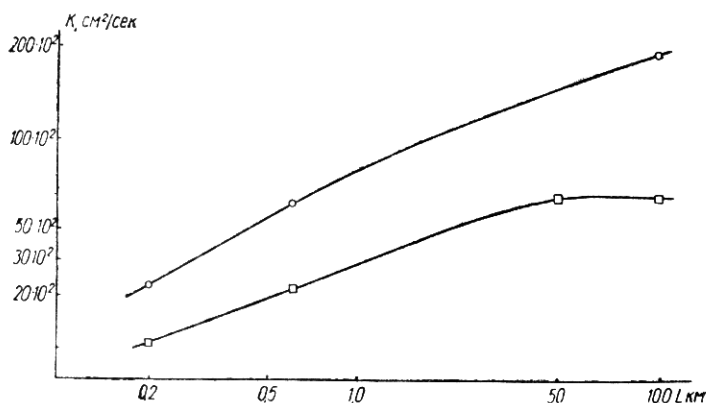


Рис. 1. Изменение коэффициентов горизонтального обмена с удалением от берега в районе Южного Крыма для разных масштабов явления: O — 200—300 м, □ — 50—200 м. Шкалы логарифмические.

ничения, накладываемые изрезанностью береговой линии, сложностью рельефа дна, сложной топографией слоя скачка плотности в прибрежной зоне и т. д.

Учитывая полученные данные, можно полагать, что в открытых частях моря «закон $\frac{4}{3}$ » выполняется.

Помимо наблюдений над горизонтальной диффузией дискретных частиц, переносимых течениями, которые позволяют определить характер зависимости коэффициентов горизонтального обмена от масштаба явления (например, зависимости типа «закона $\frac{4}{3}$ » или другого вида) имеется много определений коэффициентов горизонтального обмена, полученных на основе статистической обработки пульсаций горизонтальных скоростей течений по буйковым станциям. Основной недостаток этих определений — отсутствие данных о связи полученных коэффициентов с масштабами явления или осреднения. Этот вопрос, очевидно, был впервые рассмотрен в работе [1], в которой обнаружена степенная зависимость коэффи-

циентов обмена, вычисленных по пульсациям скоростей течений в Черном море, от периода осреднения, причем время осреднения, по мнению автора работы [1], играет в какой-то мере роль масштаба явления. Такие соображения пока не дают возможности оценить пространственные масштабы явлений для указанных коэффициентов. Однако этот вопрос можно попытаться рассмотреть, так как в условиях Черного моря получен определенный материал по «ричардсоновской диффузии» и о применимости «закона $\frac{4}{3}$ ».

Представляет интерес сопоставить коэффициенты горизонтального обмена, полученные по дрейфу свободно плавающих поплавков, с коэффициентами обмена, определенными в результате статистической обработки горизонтальных скоростей течений по методу Эртеля (см. [6]), и на основе этого получить представление о масштабах явления для последних. Поскольку сейчас накоплено много данных по течениям на буйковых станциях и такие наблюдения легче осуществить, чем прослеживание дрейфа свободно плавающих поплавков, в дальнейшем можно будет найти зависимость коэффициентов горизонтального обмена (вычисленных по этим материалам) от определяющих их факторов (течений, плотностной стратификации, удаленности от берега, относительной глубины водоема и др.) для большого спектра масштабов явления.

Такое сопоставление произведено по материалам экспедиции 1965 г. на нис «Риф» в районе Южного берега Крыма. Во время этой экспедиции наряду с прослеживанием дрейфа свободно плавающих поплавков осуществлены измерения течений при помощи вертушки БПВ-2.

Местоположение дрейфующих поплавков определяли методом прослеживания с судна, стоящего на якоре. Расстояния до поплавков находили по вертикальным углам (горизонт — глаз наблюдателя — поплавок), измеряемым секстаном, а пеленги брали при помощи пеленгатора. Методика определения положения поплавков описана в работе [3]. Во время каждого пуска на шлюпке выносили в море пять-шесть поплавков. Местоположение поплавков фиксировали через 10 мин в течение 2—3 ч. В результате обработки данных по дрейфу свободно плавающих поплавков по методу Ричардсона—Стоммела [7] получен график зависимости коэффициентов горизонтального обмена от масштаба явления (рис. 2), который аппроксимируется «законом $\frac{4}{3}$ » (показатель степени n равен 1.37; прямая

проведена по методу наименьших квадратов). Коэффициенты обмена для масштабов от 0—25 до 100—200 м изменяются от $7,2 \cdot 10^2$ до $82,9 \cdot 10^2$ $\text{см}^2/\text{сек}$.

Наряду с этим по наблюдениям над пульсациями горизонтальных скоростей течений по методу Эртеля были вычислены коэффициенты горизонтального обмена. Наблюдения над течениями

проводили при помощи БПВ-2 на глубине 5 м в течение суток. Отпечатки получены через интервалы в 5 мин. Всего обработано 176 измерений. Экстремальные величины коэффициентов горизонтального обмена (в $\text{см}^2/\text{сек}$), вычисленные путем построения «эллипса обмена»:

$$K_x = 7,2 \cdot 10^4.$$

$$K_y = 2,4 \cdot 10^4.$$

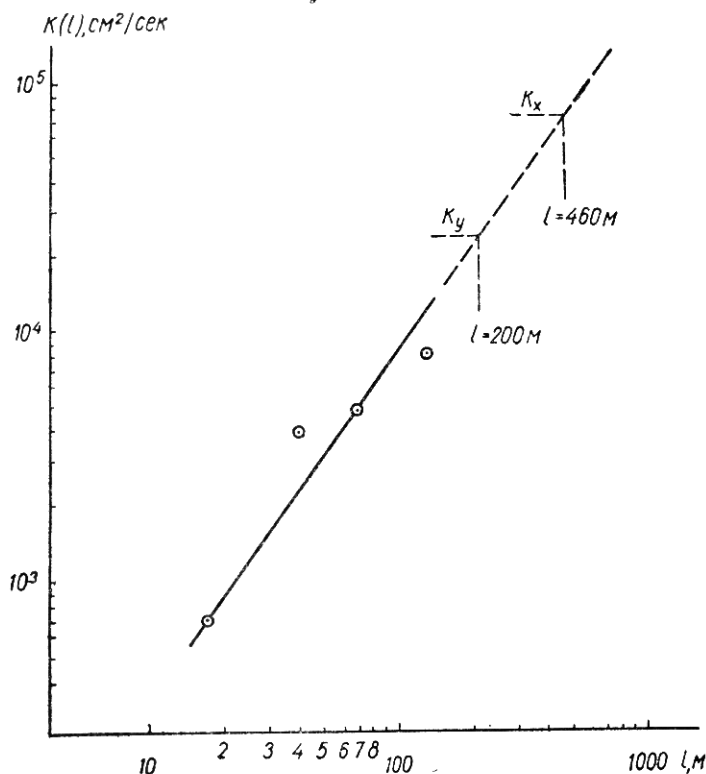


Рис. 2. Зависимость коэффициентов горизонтального обмена от масштаба явления по данным исследований в районе Южного Крыма в августе 1965 г. (нис «Риф»). Шкалы логарифмические.

Следует отметить, что поскольку мы в расчетах использовали компоненты скорости с интервалом в 5 мин, то, учитывая результаты работы [1], можно полагать, что полученные выше коэффициенты горизонтального обмена характеризуют малые вихревые образования, вызывающие пульсации скоростей. Это можно подтвердить тем, что в работе [1] для периодов осреднения 20 мин, 1 и 6 ч величины коэффициентов оказались на три порядка больше, чем у нас.

Чтобы оценить масштабы явления для полученных выше величин коэффициентов обмена, был использован рис. 2. Определяя место пересечения величин K_x и K_y с кривой, аппроксимируемой

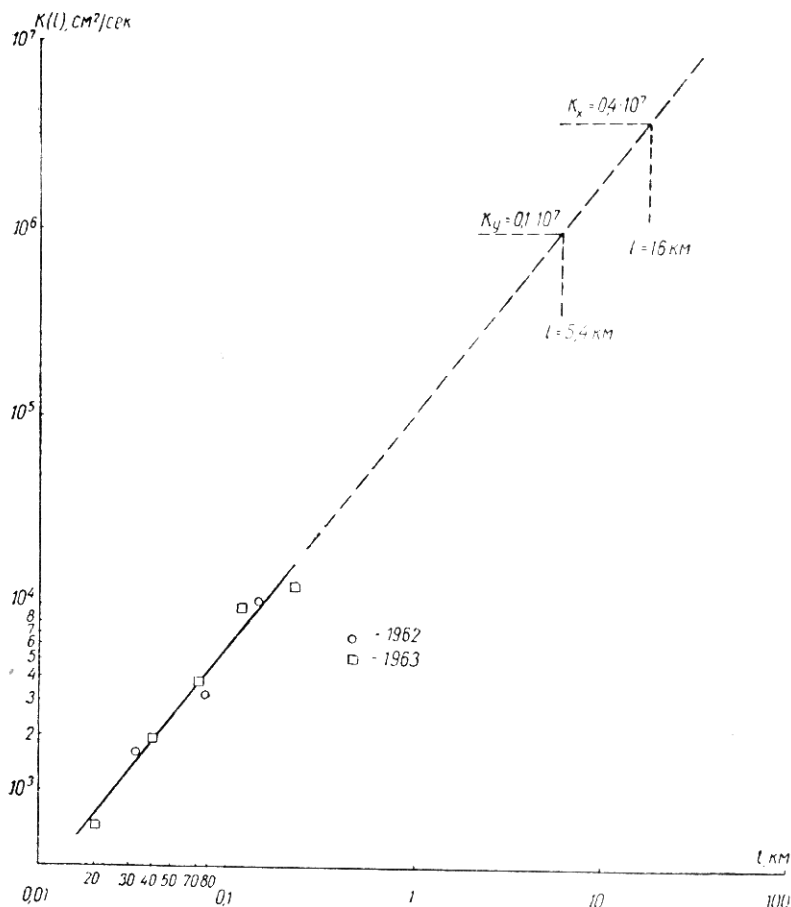


Рис. 3. Зависимость коэффициентов горизонтального обмена от масштаба явления по данным исследований в 2,5—5,0 милях от берега в районе Южного Крыма (нис «Московский университет»): O — в 1962 г., □ — в 1963 г. Шкалы логарифмические.

«законом $\frac{4}{3}$ », нашли, что коэффициентам K_x и K_y соответствуют масштабы явления порядка 200—500 м, т. е. они характеризуют маломасштабные процессы горизонтальной турбулентной диффузии.

Сделана попытка оценить масштабы явления и для коэффи-

циентов горизонтального обмена, вычисленных А. Н. Гезенцевей [1] и В. В. Хлоповым. Для этой цели использована зависимость между коэффициентами горизонтальной диффузии и масштабами явления, полученная по материалам дрейфа свободно плавающих поплавков в 2,5—5 милях от берега в районе Южного Крыма. Такие наблюдения проводились нами в 1962—1963 гг. на нис «Московский университет». На рис. 3 по этим данным приводится график функции $K(l)$, которая аппроксимируется «законом $\frac{4}{3}$ »:

$$K(l) = 0,08 \, cl^{1,30}.$$

Экстраполируя кривую вверх на большие значения коэффициентов обмена и определив место пересечения величин K_x и K_y (для горизонта 20 м), взятых из работы [1], с кривой на рис. 3, снимают затем с оси абсцисс соответствующие им величины масштабов явления.

Масштабы явлений для экстремальных величин
коэффициентов горизонтального обмена,
взятых из работы [1]

Период осреднения	$K_x \cdot 10^{-7}$	$K_y \cdot 10^{-7}$	Масштабы яв- ления, км
20 мин	0,4	0,1	5—16
1 ч	1,0	0,2	9—30
6 ч	2,4	0,2	8—60

Такая же оценка выполнена для коэффициентов горизонтального обмена, вычисленных В. В. Хлоповым по методу Эртеля для районов Ялты и северо-восточной части Черного моря. Коэффициентам обмена, имеющим порядок величины $0,2 \cdot 10^6$ — $0,5 \cdot 10^6 \, \text{см}^2/\text{сек}$, соответствуют масштабы явления порядка 2—4 км. Мнение В. В. Хлопова, что указанные коэффициенты соответствуют масштабу явления порядка 65 км, т. е. поперечнику основной струи черноморских течений в этом районе, очевидно, основано на ошибке в вычислениях. Мы, используя те же исходные данные, а именно $l = 65 \, \text{км}$ и выражение «закона $\frac{4}{3}$ » в виде $K(l) = 0,02 \, l^{4/3}$, нашли,

что коэффициент горизонтального обмена составляет $0,2 \cdot 10^8 \, \text{см}^2/\text{сек}$. Эта величина уже не совпадает с полученной В. В. Хлоповым по методу Эртеля. Так как величины коэффициентов, определенные В. В. Хлоповым, на два порядка меньше нашей, то и соответствующие им масштабы явления должны быть меньше 65 км. Нам представляется, что они лежат в диапазоне среднемасштабного обмена.

Поскольку знание зависимости коэффициентов турбулентности от определяющих факторов, в том числе и от масштаба явления, необходимо для решения многих прикладных задач, эти вопросы

требуют дальнейшего исследования. Весьма важным является проведение синхронных работ по рассеянию дискретных частиц или пятен на поверхности моря для большого диапазона масштабов явлений и по наблюдениям над пульсациями горизонтальных скоростей течений при помощи автономных буйковых станций. Это даст возможность сопоставления различных подходов при исследовании горизонтальной турбулентной диффузии. Такая работа начата в лаборатории гидрологии Института биологии южных морей АН УССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гезенцевей А. Н. О горизонтальном макротурбулентном обмене в Черном море. — Труды Ин-та океанолог., 1961, 52, 115—132.
2. Зац В. И. К вопросу о горизонтальной турбулентной диффузии в прибрежной зоне Черного моря. — Океанология, 1964, 4, 2, 249—257.
3. Лагутин Б. Л. Методы и приборы для изучения течений в море. — Труды ГОИНа, 1955, 30 (42), 13—92.
4. Озмидов Р. В. Экспериментальное исследование горизонтальной турбулентной диффузии в море и искусственном водоеме небольшой глубины. — Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1957, 6.
5. Озмидов Р. В. Исследование среднемасштабного горизонтального турбулентного обмена в океане при помощи радиолокационных наблюдений над плавающими буями. — ДАН СССР, 1959, 126, 1.
6. Штокман В. Б. О пульсациях горизонтальных компонент скорости морских течений вследствие турбулентности большого масштаба. — Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз., 1941, 4—5, 475—486.
7. Richardson L. F., Stommel H. Note on eddy diffusion in the Sea. — Journ. Met., 1948, 5, 5.