

ПРОВ 98

ПРОВ 2010

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ
им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

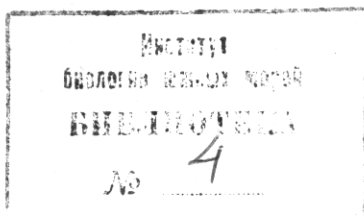
БИОЛОГИЯ МОРЕЯ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК

Основан в 1965 г.

Выпуск 41

ВОПРОСЫ САНИТАРНОЙ ГИДРОБИОЛОГИИ
И ОКЕАНОГРАФИИ



КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА» 1977

блюдений на 14-суточной станции, для других функций период наблюдений не превышал трех суток). Интегральные кривые для слоя 1—3 м районов Ялты и Сухуми близки между собой (рис. 2).

Итак, анализ интегральных функций распределения показал, что, несмотря на довольно большую изменчивость вертикальных градиентов скорости в поверхностном слое шельфовой зоны, характер их распределения для отдельных слоев одинаков.

Полученные безразмерные кривые позволяют судить о возможном диапазоне изменения градиентов скорости (около их среднего значения) и их обеспеченности для рассматриваемых районов шельфа. В дальнейшем с накоплением экспериментальных данных для различных условий можно будет получить обобщенные функции распределения градиентов для отдельных слоев и проверить степень их «универсальности» для приглубого шельфа Черного моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зац В. И., Андрищенко Б. Ф., Немировский М. С. Натурное моделирование и некоторые особенности механизма горизонтальной диффузии на устьевом взморье у приглубого шельфа Черного моря.— Материалы IV Всесоюз. симп. по проблемам самоочищения и регулирования качества воды. Таллин, 1972, 4, с. 37—49.
2. Новиков Е. А. О турбулентной диффузии в потоке с поперечным градиентом скорости.— Прикладная математика и механика, 1958, 22, вып. 3, с. 412—414.
3. Озмидов О. В., Гезенивей А. Н., Карабашев Г. С. Новые данные о диффузии примесей в море.— Изв. АН СССР, ФАО, 1969, 5, № 11, с. 1191—1204.
4. Поздынин В. Д. Определение вертикальных градиентов скорости течения в океане по данным измерителей БПВ-2.— В кн.: Исследование океанической турбулентности. М., «Наука», 1973, с. 79—85.
5. Bowden K. F. Horizontal mixing in the sea due to a shearing current.— J. Fluid Mech., 1965, 21, 1, p. 83—95.
6. Okubo A. Some remarks on the importance of the «shear effect» on horizontal diffusion.— J. Oceanogr. Soc. Japan, 1968, 24, 2, p. 60—69.
7. Okubo A., Carter H. H. An extremely simplified model of the «shear effect» on horizontal mixing in bounded sea.— J. Geophys. Res., 1966, 71, 22, p. 5267—5270.
8. Saffman P. G. The effect of wind shear on horizontal spread from an instantaneous ground source.— Quart. J. Roy Meteorol Soc. London, 1962, N 88, p. 382—393.

Институт биологии южных морей
им. А. О. Ковалевского АН УССР

Поступила в редколлегию
21.III 1975 г.

УДК 551.465.153

М. С. Немировский

К ВОПРОСУ О СКОРОСТИ ДИФФУЗИИ

Коэффициент горизонтальной диффузии K_r , входящий в полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии, изменяется в очень широких пределах, и до настоящего времени нет однозначных форм связи K_r с определяющими факторами, например с масштабами явления L . По экспериментальным данным коэффициент изменяется в зависимости от масштаба явления по степенному закону

$$K_r \sim cL^n, \quad (1)$$

где показатель степени n изменяется обычно от 0 до $4/3$. Многообразие значений n в (1) и широкий диапазон изменения абсолютных значений K_r требуют обоснованного выбора моделей $K_r(L)$ при расчетах диффузии примесей от тех или иных источников. Поэтому естественно стремление исследователей найти такой параметр турбулентной диффузии, который был бы постоянным или изменялся бы в значительно меньшем диапазоне, чем K_r .

Понятие «скорость диффузии» было введено Иозефом и Зенднером (Joseph, Sendner) [5]. В их интерпретации «скорость диффузии» P — величина сравнительно постоянная и приближенно равная 1 см/с. Решая полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии (двухмерный изотропный процесс), эти авторы использовали такую модель, когда K_r связан с радиусом пятна примеси r линейной зависимостью, а величина P , служащая коэффициентом пропорциональности, определена как скорость диффузии:

$$K_r = \frac{Pr}{2}. \quad (2)$$

Для оценки величины P по экспериментальным данным эти авторы построили «диаграммы перемешивания», по которым можно определить величину P для каждой съемки пятна. Иозеф и Зенднер построили диаграммы по своим данным и по наблюдениям разных авторов и определили значения P . Например, по диффузии радиоактивного пятна в море, распространению средиземноморских вод в Атлантике и по пятну мутных вод в Северном море величина P соответственно равнялась 1,5; 1,3 и 0,8 см/с. В 1961—1962 гг. Иозеф с соавт. [6] провели три опыта в Северном море с выпуском большого количества красителя (от 175 до 450 кг). Они наблюдали диффузию пятна родамина В в течение 113,6 ч для сравнительно больших масштабов процесса (максимальный радиус эквивалентной окружности достигал 4,166 км). Величины P можно определить по диаграммам перемешивания, построенным на основе измерений концентрации примеси.

В работе [5] предложено выражение, связывающее максимальный радиус определенной изолинии концентрации $R_{\max}$, время достижения максимального радиуса от момента выпуска $t_{\max}$ и скорость диффузии P :

$$R_{\max} = 2Pt. \quad (3)$$

С помощью (3) можно вычислить скорость диффузии P по данным аэрофотосъемки, так как обычно удается определить момент прекращения роста пятна и, следовательно, можно оценить $R_{\max}$.

Для случаев, когда аэрофотосъемка прекращена на стадии роста пятна (т. е. $R_{\max}$ и $t_{\max}$ неизвестны), Херрера (Herrera) [4] предлагает определять величину P по текущему радиусу изолинии по соотношению

$$u = 2P = \frac{\sqrt{2/3} R}{t}, \quad (4)$$

где R — радиус изолинии концентрации в момент времени t . Херрера указывает, что по экспериментальным данным изменение величины u имеет вид убывающей экспоненты. Если в начальный момент t_0 значения P равны 1,3—1,7 см/с, то в процессе диффузии они быстро убывают и ко времени t , когда средний радиус пятна достигает 1 км, скорость диффузии стремится к постоянной величине 0,4 см/с. Окубо и Притчард (Okubo, Pritchard) [9], определив значения скорости диффузии по наблюдениям разных авторов, отмечают некоторую тенденцию роста этого параметра с увеличением масштаба явления. В последние годы предложены зависимости скорости диффузии от вертикального градиента скорости течений, плотностной стратификации и др. [8]. Значения P , рассчитанные Куленбергом по экспериментальным данным, находятся в пределах 0,08—0,27 см/с для масштабов соответственно 35—480 м.

Таким образом, даже из краткого обзора видно, что введенный Иозефом и Зенднером параметр P не является постоянной величиной и изменяется в зависимости от некоторых определяющих факторов. Результаты определения величины скорости диффузии P по данным экспе-

риментальных измерений и характер зависимости этого параметра от некоторых факторов приведены ниже.

Эксперименты по изучению диффузии примеси от мгновенных точечных источников («мощностью» от 5 до 100 кг красителя) проводили в различных районах шельфовой зоны Черного моря и тропической части Южной Атлантики. В качестве красителя использовали родамин С, измерение концентрации в пятнах осуществляли флуориметром, разработанным Г. С. Карабашевым [1]. Величину P определяли по «диаграммам перемешивания»; «скорость диффузии» по соотношениям (3), (4)

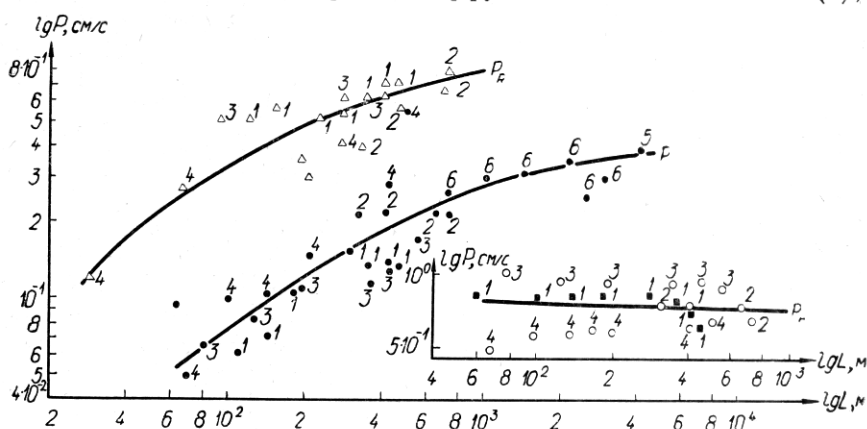


Рис. 1. Изменение скорости диффузии в зависимости от масштаба явления:

P — по «диаграммам перемешивания», P_R — по максимальному радиусу, P_R — по соотношению Херрера: 1 — Сухуми, 23.VIII 1972 г.; 2 — Ялта, 10.VI 1973 г.; 3, 4 — Южная Атлантика, 19 и 22.III 1973 г.; 5, 6 — по данным работы [6].

обозначена соответственно P_R , P_H . Все данные относятся только к стадии роста пятна, в качестве масштаба явления взят максимальный радиус пятна данной серии. Наблюдения выполнены при ветре до 6—7 м/с и волнении моря до 3—4 баллов.

Характер зависимости P от масштаба явления L показан на рис. 1. Несмотря на значительный разброс точек, отчетливо виден рост «скорости диффузии» (кривые P и P_R) с увеличением масштаба явления. Данные Иозефа и Зенднера по двум опытам хорошо согласуются с ходом кривой P , построенной по нашим экспериментам (точки 5 и 6 кривой P на рис. 1). Можно предположить, что при дальнейшем росте масштабов «скорость диффузии» стремится к величине 0,45—0,5 см/с. Следует подчеркнуть, что значения P_R , вычисленные по соотношению (3), больше, чем значения P , найденные по «диаграммам перемешивания» для одних и тех же масштабов явления (в диапазоне изменения радиусов от 20—30 м до 1 км):

$$P = 0,27P_R. \quad (5)$$

Можно предположить, что при дальнейшем увеличении размеров пятна значения P_R будут стремиться к величине 1 см/с.

В литературе по материалам аэрофотосъемки приводятся значения P_H , вычисленные по (4). В этих случаях оперируют предельной для данной пленки изолинией концентрации (по нашим данным, для родамина С предельная изолиния близка к изолинии концентрации 10^{-9} г/мл). Поэтому при расчете скорости диффузии по (4) мы использовали концентрацию 10^{-9} г/мл. Эти данные нанесены также на график (рис. 1, кривая P_H).

Вид кривой P_H существенно отличен от кривых P и P_R . Для 12 случаев из 15 «скорости диффузии», вычисленные по соотношению Феррера, либо оставались постоянными, либо имели слабую тенденцию падения,

как наблюдается по осредненной кривой P_H на рис. 1. В трех случаях кривые имели вид убывающей экспоненты (как и в работе Херрера [4]). Особенно большие расхождения в значениях P и P_H наблюдаются при малых масштабах явления. Сейчас еще трудно объяснить причину таких расхождений, но рост P и P_H с увеличением масштабов явления представляется более убедительным, чем схема убывания P_H (по крайней мере по аналогии с моделями $K_T \sim L^n$).

При исследовании характеристик диффузии выделяют предустьевые зоны, где за счет резкой плотностной стратификации в тонком по-

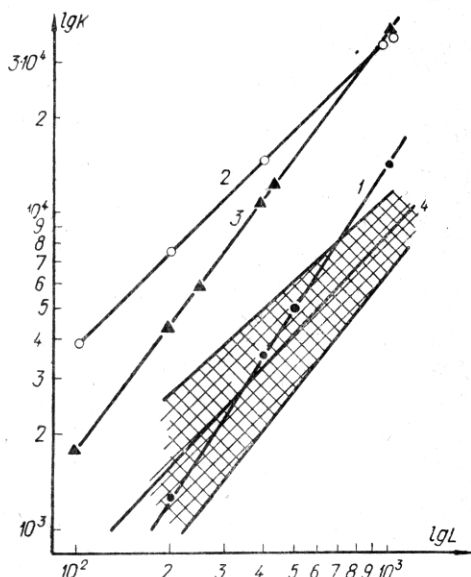


Рис. 2. Зависимость коэффициента горизонтальной диффузии K_T от масштаба явления L :

$$1-K_T \sim L^{1,52} \quad 2-K_T \sim L^{0,98} \quad 3-K_T \sim L^{1,32} \quad 4-K_T \sim L^{1,05}.$$

верхностном слое (0—10 м) изменчивость некоторых параметров диффузии примеси во времени отлична от аналогичных для более однородных водных масс: а) увеличиваются коэффициенты горизонтального обмена; б) резко возрастает скорость падения максимальной концентрации примеси; в) значительно уменьшается время достижения пятном примеси максимальных размеров.

Такие особенности наблюдались нами на предустьевых акваториях рек Бзипи (Пицунда) и Чорох (Батуми). Ито (Ito) отмечает, что для таких районов существенно возрастает и «скорость диффузии» [7]. Так, для устьев рек Окицу и Ои по экспериментальным данным «скорость диффузии» достигала соответственно 2,87 и 5,12 см/с, в то время как для других районов (прибрежных и открытых) она составляла 0,54—0,78 см/с [7].

Величины P , вычисленные по «диаграммам перемешивания» для двух предустьевых районов, представлены в таблице. Для сравнения в нижней строке приведены средние значения, снятые с кривой P (рис. 1) для соответствующих масштабов. Из таблицы видно, что «скорости диффузии» на предустьевых акваториях с резко выраженной поверхностной стратификацией в три—шесть раз больше средних значений.

«Скорость диффузии» P , см/с

Район наблюдения	Масштаб явления, м			
	90	127	130	210
Батуми	—	—	0,22	0,33
Пицунда	0,24	0,54	—	—
Среднее значение P (см. рис. 1)	0,072	0,092	0,096	0,130

Используя значения P для соответствующих масштабов по данным рис. 1, мы вычислили по соотношению (2) коэффициент горизонтальной диффузии K_T для изотропного процесса (рис. 2). Кривая 1 на рис. 2 построена по значениям P , кривая 2 — по значениям P_H , кривая 3 — по значениям кривой P_H (снятым с рис. 1). Заштрихованная область на

рис. 2 соответствует изменению K_r для всех описанных случаев по соотношению, взятому из работы Окубо [3].

$$K_2 = \frac{\sigma^2}{4t}, \quad (6)$$

где σ^2 — дисперсия горизонтального распределения красителя, t — время диффузии, масштаб явления L равен 3σ . Из рис. 2 видно, что в диапазоне масштабов до 1 км коэффициенты горизонтальной диффузии, рассчитанные по (2) и использующие величины P по «диаграммам перемешивания», хорошо согласуются со значениями K_r , найденными по формуле (6); при использовании в расчетах значений P_R и P_H получаются завышенные величины K_r (рис. 2, 2, 3).

Обращает внимание степенная зависимость коэффициентов горизонтальной диффузии K_r от масштаба явления L , а не линейная, как предполагается соотношением (2). Очевидно, это можно объяснить изменчивостью параметра P , обусловленной некоторыми определяющими факторами и тем, что, согласно Йозефу и Зенднеру [5], параметр P имеет смысл для определенной модели диффузии, а именно, если имеет место линейная зависимость коэффициента горизонтальной диффузии от масштаба явления.

Выводы. 1. «Скорость диффузии», определенная методом Йозефа — Зенднера, не остается постоянной, а растет с увеличением масштаба явления (в пределах от 10 м до 4 км). Диапазон изменения ее, по нашим и литературным данным, достигает двух порядков (от 0,01 до 1,5—2,5 см/с).

2. «Скорости диффузии», определенные по «диаграммам перемешивания» и по максимальному радиусу (3), существенно отличны. Величины P_H , рассчитанные по методу Херрера [4], завышены по сравнению с P на 0,5—1 порядок. Это отличие особенно велико для малых масштабов явления.

3. Подтверждена зависимость «скорости диффузии» от условий стратификации. Для районов с резко выраженной стратификацией «скорости диффузии» в три—шесть раз больше, чем для акватории со слабой стратификацией в верхнем слое.

4. Таким образом, параметр «скорость диффузии», характерный для определенного режима турбулентности, изменяется в зависимости от некоторых определяющих факторов, но диапазон изменений его значительно меньше, чем диапазон изменений K_r .

5. При расчете коэффициента горизонтального обмена по соотношению Йозефа — Зенднера (2) лучшее согласие с наиболее корректной в настоящее время методикой определения K_r по дисперсии горизонтального распределения красителя (6) получается при использовании параметра K_r по «диаграммам перемешивания».

ЛИТЕРАТУРА

1. Карабашев Г. С., Соловьев А. Н. Буксируемый измеритель концентрации люминесцентных индикаторов в море.— Изв. АН СССР, ФАО, 1968, 4, № 12, с. 1331—1333.
2. Озмидов Р. В. и др. Статистические характеристики полей концентрации пассивной примеси, искусственно вносимой в море.— Изв. АН СССР, ФАО, 1971, 7, № 9, с. 963—973.
3. Окубо А., Озмидов Р. В. Эмпирическая зависимость коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии в океане от масштаба явления.— Изв. АН СССР, ФАО, 1970, 6, № 5, с. 534—536.
4. Herrera L. E. Un experimento sobre diffusion turbulenta.— Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente., Xenezuela, 1967, 12, N 6 (2), p. 163—185.
5. Joseph J., Sendner H. Über die horizontale Diffusion im Meer.— Dtsch. Hydrogr. Zeit., 1958, 2, N 11, S. 49—77.
6. Joseph J., Sendner H., Weidemann H. Untersuchungen über die horizontale Diffusion in der Nordsee.— Stsch. Hydrogr. Zeit., 1964, 2, N 17, S. 57—75.
7. Ito N. On the small-scale horizontal diffusion near the coast.— J. Oceanogr. Soc. Japan, 1964, 4, N 19, p. 182—186.

8. Kullemberg G. E. B. Results of diffusion experiments in the upper region of the sea.—Kobenhavns Univer. Institut for Fysisk Oceanografi. Rep. N 12, 1971, p. 43.
9. Okubo A., Prischard D. W. Summary of our present knowledge of the physical processes of mixing in the ocean and coastal waters, and a set of practical guidelines for the application of existing diffusion equations in the preparation of nuclear safety evaluations of the use of nuclear power sources in the sea.—Chesapeake Bay Inst. The John Hopkins University. Rep. 40—3109—40. Ref. 69—1, 1969, 159 p.

Институт биологии южных морей
им. А. О. Ковалевского АН УССР

Поступила в редколлегию
25.II 1975 г.

УДК 551.465:551.465.153

Л. Д. Розман

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТЕЙ ПРИДОННЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Исследованию спектральных характеристик пульсаций скоростей течений в море посвящены работы [3—5, 7, 11], рассматривающие процессы в поверхностном слое или в основной толще вод. Статистические характеристики тонкого придонного слоя исследованы пока недостаточно. Отметим работу [11], в которой подсчитана интенсивность турбулентности и вычислены спектры пульсаций скорости течения в пределах придонного двухметрового слоя. Измерения проводили электромагнитным измерителем потока на глубинах 12—22 м в приливном течении района Северного Уэльса. Данные этих исследований относятся к области микромасштабной турбулентности. В работе [5] приведены результаты исследований структуры гидрофизических полей в придонном слое шельфа северо-западной части Тихого океана. Авторы установили наличие общего для всей толщи вод типа циркуляции, объясняя это явление эффектом взаимодействия среднего переноса и приливного течения.

Целью наших исследований было выявление типичных частот, на которых происходит приток энергии пульсаций скоростей течений в мезомасштабной области, и выяснение особенностей механизма этого процесса. Помимо теоретического интереса, ответы на поставленные вопросы имеют важное прикладное значение, проясняя энергетическую потенцию придонного слоя и его способность к перемешиванию.

Нужно сказать, что разделение масштабов достаточно условно. Мы понимаем под мезомасштабной областью область пространственных масштабов 1—10 км и временных масштабов от десятков минут до нескольких суток. Слева и справа от нее находятся соответственно области микро- и макротурбулентных образований.

Проанализированы 16 рядов наблюдений скоростей течений на горизонтах 0,5 и 1 м от дна на глубинах до 100 м по данным автономных придонных установок с вертушками БПВ-2 на шельфах в районах Ялты, Туапсе, Батуми, Пицунды, Сухуми, Сочи в 1968—1974 гг. Использование приборов БПВ-2 дает возможность изучать явления временных масштабов 40 мин — 24 ч при периоде осреднения 24 ч и дискретности 10 мин. Пространственные масштабы вихрей, полученные на основании использования гипотезы замороженной турбулентности при предположении, что переносная скорость равна 5—10 см/с, достигают 0,5—2 км [8] и 10 км [6]. Следует подчеркнуть, что приборы БПВ-2 были подвешены на неподвижной относительно дна основе. Неподвижность основания исключает наложение собственных колебаний системы на флуктуации скоростей течений, которое имеет место при работе автономных буйковых