

ПРОВ 98

ПРОВ 2010

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

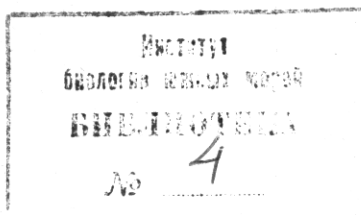
БИОЛОГИЯ МОРЕЯ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК

Основан в 1965 г.

Выпуск 41

ВОПРОСЫ САНИТАРНОЙ ГИДРОБИОЛОГИИ
И ОКЕАНОГРАФИИ



КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА» 1977

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЙ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

Резкая горизонтальная анизотропность процесса диффузии в море обусловлена совместным эффектом горизонтального и вертикального обмена и градиентами (вертикальными и горизонтальными) скоростей течений. Это явление получило название «диффузии со сдвигом».

Исследование «эффекта сдвига» впервые было сделано Тейлором (Taylor) для потоков в трубах (цит. по [6]). Общее решение уравнения турбулентной диффузии примеси от мгновенного точечного источника в потоке с поперечным градиентом скорости получено Е. А. Новиковым [2]. Им определено критическое время, начиная с которого влияние вертикальных градиентов скорости на процесс диффузии становится существенным.

Дальнейшее развитие этот вопрос получил в работах [3, 6, 7]. Не останавливаясь подробно на результатах проведенных исследований [3, 6], можно сделать общий вывод: наблюдающиеся в море градиенты скорости течений играют важную роль в процессе распространения примеси в море, существенно влияя как на форму пятен и струй, так и на интенсивность общего перемешивания. Тем не менее исследованию градиентов скоростей течений уделяется мало внимания. При оценке роли градиентов в распространении примеси многие авторы исходят в основном из произвольно выбранной скоростной структуры потока. Так сделано, например, в работе [8], где получено выражение для эффективного коэффициента горизонтальной диффузии (k_x) для простых видов функции $U(z)$. В работе [5] значение k_x уже вычислено для нескольких типичных профилей скорости при определенных предположениях относительно k_z .

Значения вертикальных градиентов скорости течения в океане по данным измерений БПВ определены в работе [4]. Автор предлагает вычислять их, пользуясь приемами проверки статистических гипотез о равенстве средних и дисперсий выборок.

Цель данной статьи — выявить основные особенности вертикальной структуры течений верхнего десятиметрового слоя шельфовой зоны Черного моря, с тем чтобы в дальнейшем оценить их роль в распространении примесей.

Исходными материалами послужили данные наблюдений над течениями с помощью самописцев БПВ на полигонах в районах приглубого шельфа Черного моря. Для выявления основных закономерностей в распределении вертикальных градиентов скоростей течений был проведен статистический анализ градиентов, полученных на фактическом материале. Рассматривались функции распределения градиентов в разных районах (Ялте, Сочи, Сухуми) в слоях толщиной 1—3, 1—5, 3—10, 5—10 м, характерные для теплого периода года с резко выраженным верхним слоем скачка плотности (июнь — август 1972 г., июнь 1973 г., июль — август 1974 г.). Всего проанализировано 30 реализаций объемом от 90 до 1870 членов (n). Примеры кривых распределения вероятностей градиентов скоростей P приведены на рис. 1. В основном при достаточно большом числе наблюдений (n) распределение приближается к нормальному, хотя возможны случаи, когда нормальный закон в достаточной степени выполняется и для коротких рядов. Полученные плотности вероятностей наглядно показывают, что диапазон изменения градиентов скоростей в верхнем слое достаточно широк, причем функции распреде-

ления лежат как в отрицательной, так и в положительной областях значений градиентов.

Анализ кривых распределения градиентов по слоям позволил выделить для тонкого верхнего однородного слоя следующие типы изменчивости градиента скорости $\left(\frac{\Delta V}{\Delta z}\right)$ по вертикали (z):

а) $\frac{\Delta V}{\Delta z} < 0$ во всем десятиметровом слое (скорость монотонно или резко убывает с глубиной);

б) $\frac{\Delta V}{\Delta z} < 0$ в верхнем слое до 3—5 м, а глубже до $z = 10$ м, $\frac{\Delta V}{\Delta z} > 0$, т. е. скорость сначала уменьшается, а потом возрастает с глубиной;

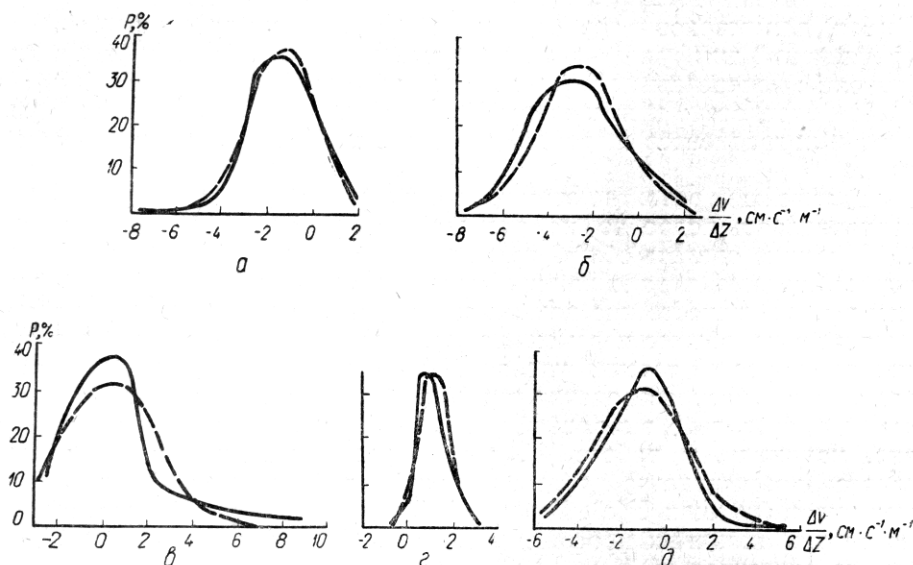


Рис. 1. Плотность распределения вероятностей вертикальных градиентов скорости течения для различных районов и слоев:

а — Ялта, 23—24.VI 1972 г., 1—3 м, $n=349$; б — Ялта, 26.VI 1972 г., 1—3 м, $n=90$; в — Сухуми, 17.VIII 1972 г., 3—10 м, $n=91$; г — Ялта, 6.VII 1972 г., 5—10 м, $n=119$; д — Сочи, 27.VII—9.VIII 1974 г., 5—10 м, $n=1870$.

Сплошная линия — эмпирическая плотность распределения; штриховая — закон нормального распределения.

в) $\frac{\Delta V}{\Delta z} > 0$ до $z = 3—5$ м, ниже скорость убывает и до $z = 10$ м $\frac{\Delta V}{\Delta z} < 0$. Каждая из этих схем может варьировать в зависимости от абсолютных значений $\frac{\Delta V}{V_z}$. Наибольшей изменчивостью отличается тонкий поверхностный слой 1—3, 1—5 м, подверженный воздействию ряда динамических факторов. В этом слое отмечаются максимальные градиенты, причем при падении скорости их абсолютные значения выше, чем при ее росте. С уменьшением временного масштаба осреднения наблюдается закономерное увеличение значений градиентов.

Максимальные вертикальные градиенты скорости в слое 1—3 м в районе Сухуми составляли для интервалов времени 0,5—3 ч — 22—25 $\text{см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ (тип б) и 17—20 $\text{см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ (тип в). В районах Ялты и Сочи наибольшие значения $\left(\frac{\Delta V}{\Delta z}\right)$ при падении скорости (типы а и б) равнялись в слое 1—5 м — 9—11 $\text{см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. В тех случаях, когда наблюдался рост скорости с глубиной (тип в), максимальные значения градиентов были порядка 5 $\text{см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Интересно отметить, что в течение всего экспери-

мента в районе Ялты 10.VI 1973 г. (12,5 ч) в верхнем пятиметровом слое был отмечен рост скорости с глубиной (средний градиент составил $2,8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$). Во всех опытах преобладали ситуации, когда скорости с глубиной понижались ($\frac{\Delta V}{\Delta z} < 0$). Случаи, когда скоростное поле поверхностного слоя было однородно по глубине ($\frac{\Delta V}{\Delta z} = 0$), отмечались весьма редко и были непродолжительны по времени (не более часа).

Помимо значительных градиентов скоростей отмечался также существенный сдвиг в направлении течений в верхнем слое. В отдельных случаях он соответствовал спирали Экмана, а чаще имел более сложную форму. Такая сильная изменчивость скоростей и направлений течений в верхнем слое способствовала тому, что облако примеси, располагающееся в слое 0—5 и 0—10 м, как бы растаскивалось по слоям в разные стороны. Естественно, что перемешивание отдельных слоев и всего облака в целом в этих условиях шло значительно интенсивнее. По данным [1], коэффициенты горизонтальной диффузии в этом случае были на один-два порядка выше, чем на других акваториях. Таким образом, при прочих равных условиях процессы горизонтального перемешивания будут тем интенсивнее, чем больше градиенты скоростей и сдвиг по направлению, о чем свидетельствуют проводимые эксперименты.

Полученные результаты свидетельствуют о весьма сложной вертикальной структуре течений поверхностного слоя. В рассматриваемых районах приглубого шельфа она определяется особенностями плотностной стратификации и изменчивостью ветрового режима за счет как крупномасштабных процессов, так и местных особенностей циркуляции. На основные ветровые потоки, направленные вдоль берега, накладываются локальные возмущения: бризы, горно-долинные ветры и др. Существенное значение имеют эффекты сгущения и разряжения линий тока вблизи мысов, заливов и т. п. Преобладающие ветровые потоки служат источником энергоснабжения основного вдольберегового черноморского течения, а местные воздействия являются генераторами возмущений верхнего слоя. Интенсивность локальных ветровых воздействий достаточна для того, чтобы осуществить перенос воды в тонком поверхностном слое до 5 м. Периодические изменения скорости и направления ветра, вызванные бризовой и горно-долинной циркуляцией, обуславливают смену знака градиента в подповерхностном слое. Для таких ситуаций типичны модели типов *б* и *в*, как правило, сменяющие друг друга. Сравнительно большая продолжительность измерений на полигоне в районе Сочи (14 суток) позволила выявить довольно четкую периодичность в изменении скорости течения в тонком поверхностном слое, вызванную бризовой циркуляцией. Как правило, падение скорости в верхнем пятиметровом слое имело место в ночные и утренние часы, а рост ее наблюдался в основном во второй половине дня (от 12 до 21 ч).

Когда влияние локальной ветровой циркуляции ослаблено, в поверхностном слое отмечается падение скорости с глубиной (тип *а*).

Наклоны слоев различной плотности в районах устьевого взморья, сгонно-нагонные явления, эффекты циркуляции Ленгмюра также могут привести к изменчивости скоростного поля. Наложение таких разномасштабных процессов создает сложную структуру течений верхнего слоя шельфовой зоны.

Для выявления общих закономерностей в распределении вертикальных градиентов поверхностного слоя были построены интегральные функции распределения градиентов в безразмерной форме. Значения градиентов нормировались на средний модуль градиента в слое. Эмпирические функции $F\left(\frac{\Gamma}{|\bar{\Gamma}|}\right)$ рассчитаны по данным наблюдений в районе Ялты,

Сочи, Сухуми (рис. 2, 3). Анализ интегральных функций для разных слоев показал, что они существенно отличаются друг от друга даже в одном и том же районе. Так, в районе Ялты кривые распределения для слоев 1—3 и 5—10 м значительно разнятся в области высокой обеспеченности (рис. 2, а, 3, а).

Функции распределения, вычисленные для разных районов, но для одних и тех же слоев, наоборот, почти не имеют различий. Кривые рас-

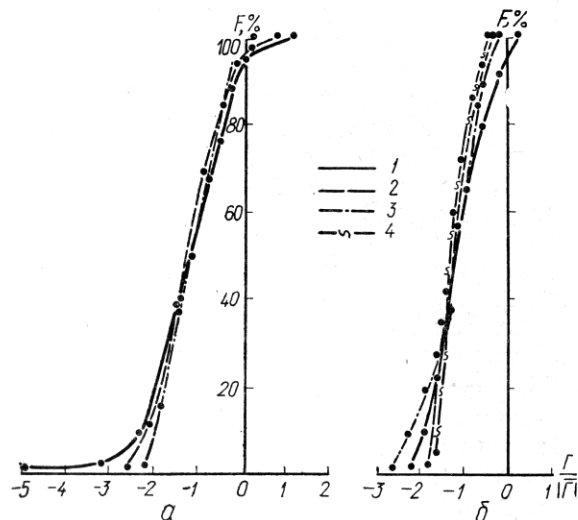


Рис. 2. Интегральные функции распределения градиентов скорости течения в слое 1—3 м для районов:

а — Ялта: 1 — 23—24.VI 1972 г., 2 — 26.VI 1972 г., 3 — 28.VI 1972 г.; б — Сухуми: 1 — 1.VIII 1972 г., 2 — 17.VIII 1972 г., 3 — 19.VIII 1972 г., 4 — 23.VIII 1972 г.

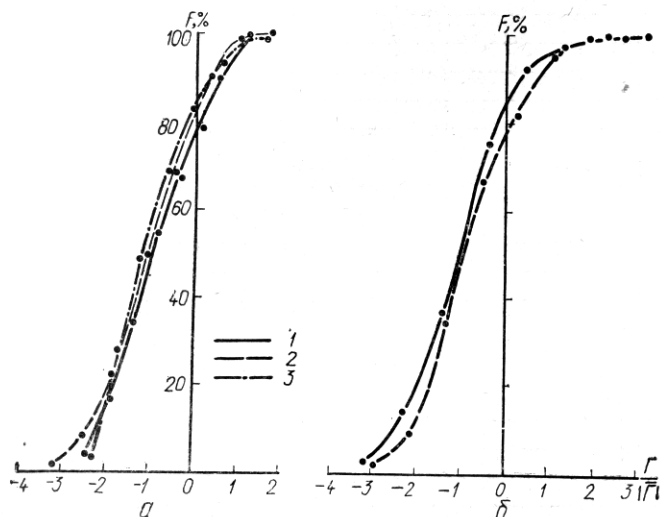


Рис. 3. Интегральные функции распределения градиентов скорости течения в слое 5—10 м для районов:

а — Ялта: 1 — 23—24.VI 1972 г., 2 — 28.VI 1972 г., 3 — 4.VII 1972 г.; б — Сочи: 1 — 27.VII—9.VIII 1974 г., 2 — 5—7.VIII 1974 г.

пределения градиентов в слое 5—10 м в районе Ялты и Сочи практически совпадают (рис. 3). Небольшие отличия в области положительных значений безразмерного коэффициента обусловлены разным временным масштабом (кривая 1 рис. 3 для района Сочи построена по данным на-

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 $\frac{4}{3}$. 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 .