

ПРОВ 98

ПРОВ 2010

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

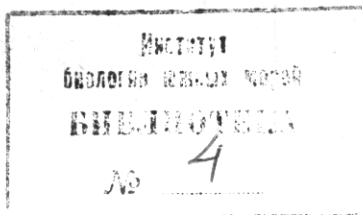
БИОЛОГИЯ МОРЕЯ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК

Основан в 1965 г.

Выпуск 41

ВОПРОСЫ САНИТАРНОЙ ГИДРОБИОЛОГИИ
И ОКЕАНОГРАФИИ



КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА» 1977

оси y' — большая. Если же знаки противоположные, то после поворота осей на угол в соответствии со знаком α_0 малая полуось эллипса откладывается по оси y' , а большая по оси x' . Ориентация эллипса будет та же, что и при пользовании таблицей. Положительное направление новых осей x' и y' находится весьма просто. При отрицательных значениях α_0 и $A_{\lambda\phi}$ положительное направление оси x' будет противоположно найденному. При положительных знаках α_0 и $A_{\lambda\phi}$ найденное направление x' будет положительным. Если знаки α_0 и $A_{\lambda\phi}$ противоположны, то положительное направление оси отклоняется против часовой стрелки на 90° .

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова А. К. Процессы горизонтального и вертикального обмена в Тунисском проливе по наблюдениям в зимнее время.— В кн.: Океанограф. исследования в Тунисском проливе. К., «Наук. думка», 1971, с. 26—43.
2. Гезенцевей А. Н. О горизонтальном макротурбулентном обмене в Черном море.— Труды Института океанологии АН СССР, 1961, 52, с. 115—132.
3. Зац В. И., Кандыбко В. В. Зависимость среднемасштабного горизонтального обмена от определяющих факторов и его пространственная изменчивость у приглубых шельфов.— Биология моря, 1972, вып. 27, с. 96—110.
4. Николаев С. Т., Луйск Т. Э. О пространственной изменчивости характеристик крупномасштабной турбулентности и макрообмена в Балтийском море.— Изв. АН СССР, ФАО, 1975, 11, № 8, с. 366—369.
5. Тимофеев В. Т., Панов В. В. Косвенные методы выделения и анализа водных масс. Л., Гидрометеиздат, 1962, 249 с.
6. Толмазин Д. М., Шнайрман В. А., Ациховская Ж. М. Проблемы динамики вод северо-западной части Черного моря. К., «Наук. думка», 1969, 128 с.
7. Хлопов В. В. Изменение коэффициента перемешивания по наблюдениям в Черном море.— Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1958, № 2, с. 235—243.
8. Хлопов В. В. Коэффициент перемешивания и его изменения с глубиной и по времени для открытой части Черного моря.— Труды ГОИН, 1959, вып. 47, с. 30—37.
9. Штокман В. Б. О турбулентном обмене в средней и южной части Каспийского моря.— Изв. АН СССР, Сер. географ., геофиз., 1940, № 4, с. 569—592.

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

Поступила в редколлегию
14.II 1975 г.

УДК 551.465.153

А. К. Богданова, Т. П. Коваленко

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА В ТУНИССКОМ ПРОЛИВЕ И В ПРИБОСФОРСКОМ РАЙОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Вопросы турбулентного обмена и перемешивания в стратифицированных проливах приобретают все большее значение как в теоретическом плане, так и при решении практических задач.

В статье рассматриваются особенности структуры среднемасштабной турбулентности в двух специфических районах Средиземноморского бассейна — в узкой части Тунисского пролива и прибофорском районе Черного моря, определяются ориентация экстремальных значений турбулентного обмена и степень анизотропности обмена при различных ветровых условиях над морем и в разные сезоны. Наблюдения над течениями проводили в январе — марте 1970 г., декабре 1971 и августе — октябре 1972 г. Течения измеряли на протяжении 1—5 суток вертушками БПВ-2 на автономных буйковых станциях (АБС) и придонных установках; дискретность измерений 10 и 5 мин (рис. 1). В прибофорском районе Черного моря использованы наблюдения над течением в черноморском потоке, в переходном слое и в струе средиземноморских вод.

Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена количеством движения A вычислялись методом Эртеля — Штокмана [3]. Влияние разномасштабных вихрей на процессы обмена выявлялись методом сглаживания косинус-фильтром [2] меридиональной и зональной составляющих наблюдаемых рядов скорости по периодам T_0 : 0,67, 1, 2, 4, 6, 10, 12, 20, 24, 40, 48 ч. При этом предполагалось, что все составляющие с периодом, большим периода сглаживания, относятся к закономерным из-

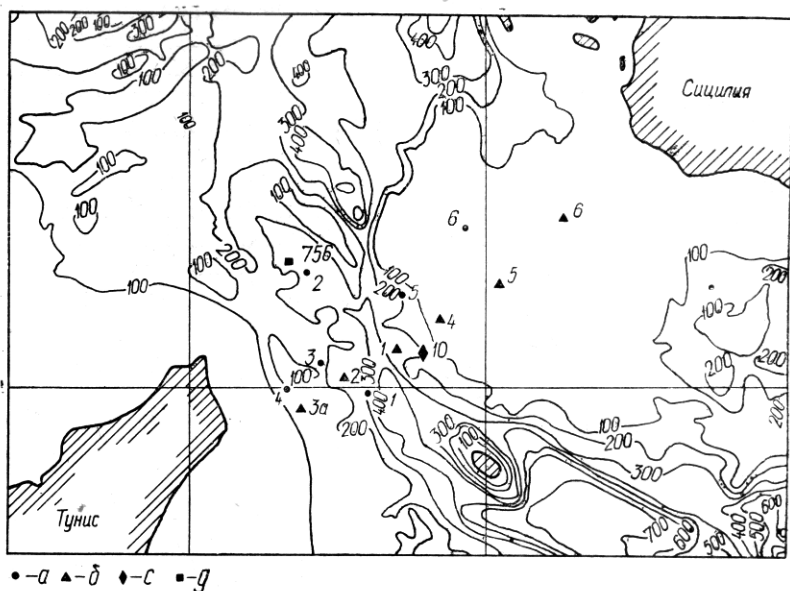


Рис. 1. Схема расположения буйковых станций в Тунисском проливе: а — I, II 1970 г.; б — VIII, IX 1972 г.; в — XII 1971 г.; д — II 1962 г.

менениям осредненной скорости, а более высокочастотные колебания пульсаций рассматривались как турбулентные.

Горизонтальная структура турбулентного обмена исследуемых потоков характеризуется эллипсами обмена, форма и ориентация которых относительно результирующего вектора скорости дают представление о распределении в пространстве значений A . Степень анизотропности обмена представлена отношением $A_{\max}/A_{\min}$.

Анализ данных по структуре течений при различных гидрометеорологических условиях позволил обнаружить связь между скоростью и устойчивостью исследуемого потока и формой и ориентацией эллипсов горизонтального обмена; между вкладом инерционной составляющей в поле скорости и изменением структуры турбулентного процесса с расширением спектра вихрей. Обуславливается данная связь, вероятно, изменением величины и направления горизонтальных градиентов скорости и плотности в исследуемом потоке в зависимости от поля ветра над морем и структуры исследуемого поля скорости.

В устойчивом потоке с большими скоростями (в проливах, вблизи берега и на других акваториях) поперечные градиенты скорости всегда превышают продольные на один-два порядка. В неустойчивом потоке или при наличии в потоке периодической составляющей продольные градиенты скорости могут быть того же порядка или превышать поперечные.

В зависимости от соотношения разномасштабных вихрей в структуре исследуемого потока изменялись значения A , зависимость от масштаба явления A (T_0), степень анизотропности ($A_{\max}/A_{\min}$) и направление

наиболее интенсивного обмена относительно вектора результирующей скорости.

При сильных ветрах устойчивых западных направлений, наблюдавшихся в январе 1970 г., течение во всей толще Тунисского пролива характеризовалось большими скоростями и высокой устойчивостью, отсутствием или несущественным вкладом инерционной составляющей.

Турбулентный обмен в этих условиях имеет ярко выраженную анизотропность с максимумом в поперечном направлении (эллипсы вытянуты вдоль потока). Наибольшей анизотропностью отличался верхний 50-

метровый слой, где было самое сильное и устойчивое течение, наименьшей — промежуточный слой на глубине 200 м, где эллипсы меняли форму и ориентацию. Подобная картина наблюдалась в других районах пролива на горизонтах с относительно высокой скоростью и устойчивостью и сохранялась при всех периодах сглаживания T_0 от

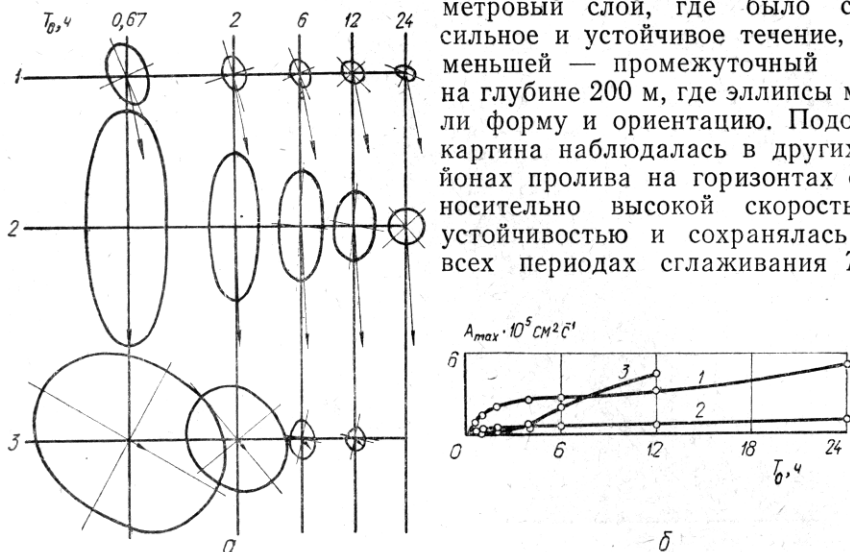


Рис. 2. Изменение эллипсов обмена (а) и максимальных значений коэффициентов обмена $A_{\max}$ (б) с увеличением масштаба осреднения T_0 на АБС-4 в Тунисском проливе (25—28.I 1970 г.) на глубине:
1 — 10, 2 — 50, 3 — 150 м.

0,67 до 24 ч. Чем больше была скорость и устойчивость потока, тем интенсивнее поперечный обмен по сравнению с продольным (рис. 2). На горизонтах с небольшой устойчивостью течения эллипсы обмена при увеличении периода сглаживания приближались к окружностям, но горизонтальный обмен развивался интенсивнее в поперечном направлении к потоку.

При сильном ветре и течении коэффициенты A значительно увеличиваются в верхних слоях за счет относительно мелких вихрей*. Соответственно кривые $A(T_0)$ резко возрастают в области мелких вихрей и плавно — с дальнейшим расширением масштаба сглаживания T_0 . При небольших скоростях ветра и течения кривые $A(T_0)$ плавно возрастают при всех периодах осреднения.

Поскольку скорость и направление результирующего потока менялись в пространстве и с глубиной, то естественно изменялась ориентация эллипсов и степень анизотропности обмена. Это свидетельствует о сложной и изменчивой структуре турбулентности в Тунисском проливе зимой 1970 г.

В декабре 1971 и октябре 1972 г. при неустойчивых ветрах формировалось слабое и менее устойчивое течение в проливе, что обусловило зарождение инерционных колебаний скорости в потоке. Структура потока усложнилась за счет существенного вклада инерционной составляющей.

* Среднемасштабная область турбулентного обмена условно подразделена на три участка спектра: от 0,67 до 1—2 ч — относительно мелкие вихри, от 2 до 4 ч — средние, от 6 до 24 ч — крупные.

щей в исследуемом поле скорости. Ее вклад на различных горизонтах и участках пролива был неодинаков. Наибольшая амплитуда инерционных колебаний скорости отмечалась в промежуточных слоях, характеризующихся максимальными градиентами плотности и скорости. В зависимости от вклада инерционного течения менялись соотношения разномасштабных вихрей в структуре потока, величины коэффициентов горизонтального обмена, функция $A(T_0)$, ориентация эллипсов обмена и степень анизотропности турбулентного процесса. Пространственная характеристика процесса горизонтальной турбулентности и ее изменение по глубине выявляется по эллипсам обмена в проливе (рис. 3).

Устойчивость течения при наличии инерционной составляющей зависела от величины и направления анизотропности орбит инерционного

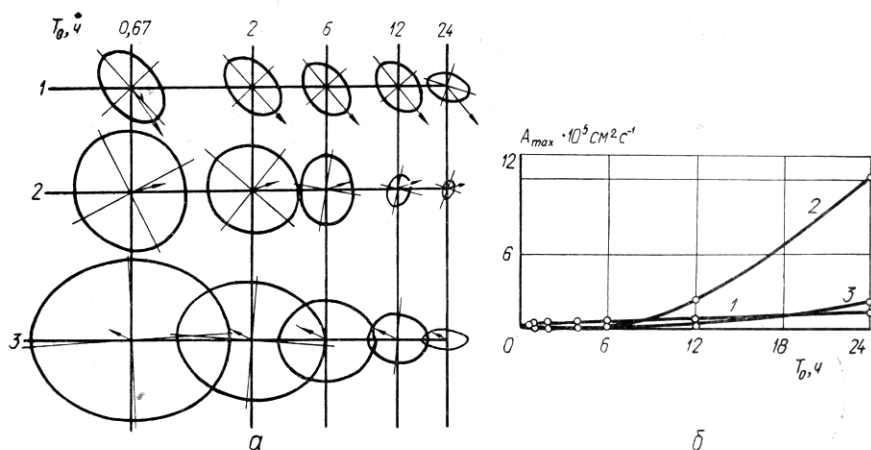


Рис. 3. Изменение эллипсов обмена (а) и максимальных значений коэффициентов обмена A_{max} (б) с увеличением масштаба осреднения T_0 на АБС-1 в Тунисском проливе (август 1972 г.) на глубине:

1 — 10, 2 — 75, 3 — 350 м.

колебания скорости. Если направление вытянутости орбиты совпадало с направлением остаточного течения, то устойчивость увеличивалась, а если они были взаимно перпендикулярны, — уменьшалась.

При слабом и неустойчивом потоке без заметного влияния инерционной составляющей скорости эллипсы обмена приближались к окружности, т. е. горизонтальный обмен был почти изотропный; в некоторых случаях при включении в исследуемый спектр крупных вихрей они меняли форму и ориентацию.

При существенном вкладе инерционной составляющей скорости, что наблюдалось в промежуточных слоях, эллипсы обмена меняли размеры, ориентацию и форму. В относительно мелкомасштабной области спектра эллипсы незначительно уменьшали размеры и были вытянуты примерно вдоль результирующего потока, т. е. горизонтальный обмен более интенсивно развивался в поперечном направлении. При расширении спектра до 2—4 ч максимальный обмен развивался в направлении потока; дальнейшее расширение спектра вихрей (до 6, 10, 12, 20, 24 ч) сопровождалось увеличением анизотропности турбулентного процесса, с максимальным обменом вдоль результирующего потока. Такой характер изменения коэффициентов A с расширением масштаба хорошо выражен на кривых $A(T_0)$ (рис. 3).

В прибосфорском районе Черного моря при условии устойчивого черноморского течения ($E=0,83-0,93$), наблюдавшегося в марте 1970 г., эллипсы обмена были вытянуты вдоль потока (рис. 4), т. е. наибольший обмен при всех периодах сглаживания отмечался в поперечном

направлении к потоку. Коэффициенты в поперечном направлении превышали продольные в 3,6—3,8 раза в мелкомасштабной области и в 1,7—2,3 раза при расширении масштаба до 24 ч.

Осенью 1972 г. черноморское течение для разных периодов изменялось по скорости и устойчивости. Поскольку ряд охватывал различные состояния потока, он был разбит на два периода, в соответствии с ветровыми условиями и режимом течения (с 9 по 11.X и с 11 по 13.X 1972 г.). Статистическая обработка и определение коэффициентов A проведены по всему ряду и отдельно по интервалам.

Эллипсы обмена для неустойчивого и слабого течения (по всему ряду наблюдений и с 9 по 11.X 1972 г.) были вытянуты по-разному: на

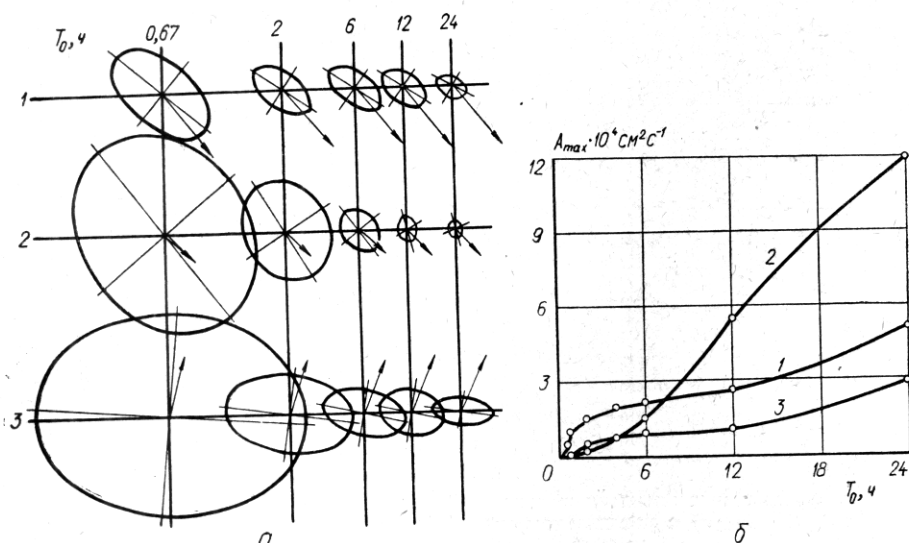


Рис. 4. Изменение эллипсов обмена (а) и максимальных значений коэффициентов обмена A_{max} (б) с увеличением масштаба осреднения T_0 в прибосфорском районе Черного моря (март 1970 г.) на глубине:
1 — 10, 2 — 85, 3 — 91 м.

горизонте 10 м — поперек потока, на 25 и 50 м — вдоль, для всех исследуемых масштабов (от 0,67 до 24 ч) — вдоль потока и только для масштаба сглаживания ряда $T_0=48$ ч эллипсы обмена меняли ориентацию примерно на 90° . Если бы исследовался только крупномасштабный процесс, то можно было бы сделать такой же вывод, как и у В. Б. Штокмана (3): вдоль результирующего потока горизонтальный обмен развивается наиболее интенсивно. Однако анализ обмена для разных масштабов T_0 показал, что смена направления наиболее интенсивного обмена с поперечного на продольный происходит лишь при включении в исследуемый спектр крупных вихрей (T_0 от 24 до 48 ч).

В период более сильного и устойчивого течения (с 11 по 13.X 1972 г.) эллипсы обмена вытягивались вдоль потока в мелком и среднемасштабном участках спектра турбулентных вихрей (от 0,67 до 6 ч) и приближались к окружности при расширении масштаба до 12—24 ч (рис. 5).

В переходном слое от черноморского течения к средиземноморскому, характеризующемуся большими вертикальными градиентами плотности и скорости, с увеличением масштаба T_0 эллипсы обмена также меняли форму и ориентацию. В области мелких вихрей они вытягивались примерно вдоль потока, поперечный обмен превышал продольный в 2,5—3 раза; в области средних вихрей анизотропия ослаблялась, эллипсы стремились принять форму окружности и поворачивались вправо. В круп-

номасштабной области анизотропность турбулентного процесса несколько увеличивалась и максимальный обмен развивался примерно в продольном направлении.

В струе средиземноморских вод процессы горизонтального турбулентного обмена в марте 1970 г. и октябре 1972 г. развивались неодинаково. Хотя течение было устойчивое, но менялись степень анизотропности и ориентации экстремальных величин относительно результирующего вектора скорости. Когда направление средиземноморского и черноморского потоков было почти противоположным, наиболее интенсивный обмен развивался приблизительно вдоль потока (март 1970 г.). В случае, когда движение средиземноморских и черноморских вод было

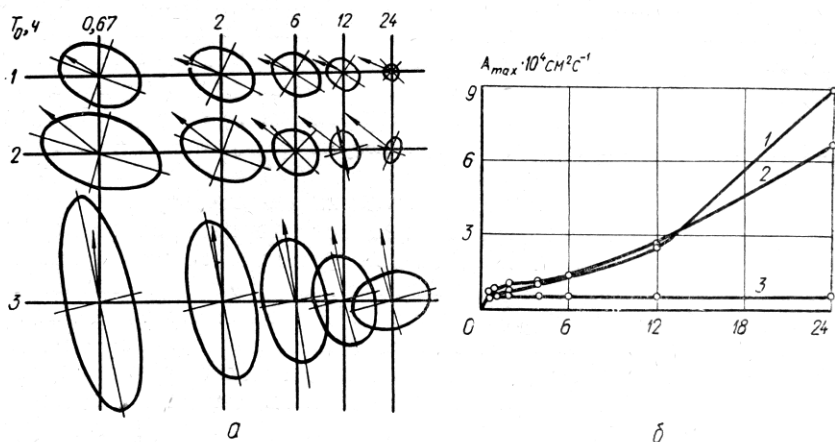


Рис. 5. Изменение эллипсов обмена (а) и максимальных значений коэффициентов обмена A_{max} (б) с увеличением масштаба осреднения T_0 в прибосфорском районе Черного моря (октябрь 1972 г.) на глубине:

1 — 15, 2 — 80, 3 — 94 м.

спутным, наибольший обмен развивался в поперечном направлении к потоку (октябрь 1972 г.). Изменение направления максимального обмена подтверждалось соответствующим распределением кинетической энергии турбулентности: в марте максимум энергии приходится на меридиональную составляющую пульсаций скорости, в октябре — на зональную.

Изменение интенсивности турбулентного перемешивания, степени анизотропности и направления экстремальных значений коэффициентов горизонтального обмена в струе средиземноморских вод и в переходном слое, вероятно, и определяет различные формы растекания средиземноморских вод и степень разбавления их черноморской водой в прибосфорском районе в разные сезоны и годы, при неодинаковых гидрометеорологических условиях.

Изменение направления интенсивного обмена относительно результирующего потока можно объяснить следующим образом: если направление вытянутости различных вихревых образований (мелких, средних, крупных) и энергетический вклад их в турбулизацию потока разные, то при расширении масштаба T_0 форма и ориентация эллипсов меняются. Если энергетический вклад мелких и более крупных вихрей примерно одинаков, а направленность вытянутости вихревых образований противоположна, то турбулентный перенос приближается к изотропному. При дальнейшем расширении масштаба, когда вклад крупных вихревых образований станет больше мелких, направление наиболее интенсивного обмена для всего набора турбулентных вихрей в потоке определяется крупными вихрями. Если направление развития разномасштабных вихревых образований в потоке совпадает, то с расширением масштаба явления ориентация эллипсов четко сохраняется.

Одинаковая методика сбора и обработки материала позволила дать по экстремальным значениям коэффициентов сравнительную характеристику интенсивности развития турбулентных процессов Тунисского пролива и прибосфорского района Черного моря при различных ветровых ситуациях [1].

Процессы горизонтального турбулентного обмена в Тунисском проливе при любых погодных условиях развивались интенсивнее по сравнению с прибосфорским районом Черного моря. Это связано, вероятно, со значительной изрезанностью рельефа дна и более сложной структурой поля ветра и течения в проливе, который соединяет западную и восточную части Средиземного моря. Быстрые перемещения центров атмосферной циркуляции, сопровождавшиеся сменой силы и направления ветра в районе пролива, порождают инерционные колебания скорости, в условиях разнонаправленных течений еще более усложняющие структуру потоков. Экстремальные значения коэффициентов A в верхнем слое Тунисского пролива при сильных ветрах превышали значения A в прибосфорском районе в пять-шесть раз, при умеренном ветре — в восемь-десять раз.

Вихревая структура потоков в обоих районах существенно менялась, если в поле скорости прослеживалась инерционная составляющая. В этом случае отмечалось значительное увеличение коэффициентов A при расширении спектра вихрей в область крупных масштабов. При таких условиях значения коэффициентов в Тунисском проливе были выше, чем в прибосфорском районе (в переходных слоях), в 16—46 раз.

Таким образом, в Тунисском проливе и прибосфорском районе Черного моря зимой 1970 г. и ранней осенью 1972 г. турбулентный процесс развивался анизотропно: наиболее интенсивно в поперечном направлении к результирующему течению или под небольшим углом к нормальному сечению потока. Однако в зависимости от гидрометеорологических условий изменялась степень анизотропности по глубине и с расширением масштаба явления, а также менялось направление экстремальных значений A относительно результирующего потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова А. К. Сравнительная характеристика горизонтальной турбулентности в Тунисском проливе и прибосфорском районе Черного моря.— В кн.: Исследование водообмена через Тунисский пролив и Босфор. К., «Наук. думка», 1976.
2. Озмидов Р. В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. М., «Наука», 1968. 196 с.
3. Штокман В. Б. О турбулентном обмене в средней и южной части Каспийского моря.— Изв. АН СССР. Сер. географ., геофиз., 1940, № 4, с. 569—592.

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

Поступила в редколлегию
25.11 1975 г.

УДК 551.46.09

В. И. Тимошук

ЗАРЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА КАК ФАКТОР ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

Зарегулирование речного стока и строительство водохранилищ нарушило скорости круговорота воды на его отдельных участках. Перестройка водных систем и перераспределение материковых вод оказывают существенное влияние на экологию морских бассейнов. Положение