

Глава 4. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЙ ПРИБРЕЖНО-ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ РОССИИ

4.1. Общая характеристика циркуляции вод

Натурные исследования течений в прибрежно-шельфовой зоне с помощью автономных буйковых станций (АБС) в российском секторе моря проводятся Южным отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова с 1955 года. Сначала это были непродолжительные (несколько суток) измерения. Затем, с усовершенствованием технических средств, продолжительность непрерывных измерений увеличилась. С января 1976 г. по июнь 1981 г. были выполнены непрерывные измерения течений со стабилизированного буя, расположенного на шельфе (глубина постановки 70 м) в районе Геленджика (Титов, 1989; Кривошея, Титов, 1990).

В 80-е и 90-е годы для изучения циркуляции вод и течений в прибрежной 20-мильной зоне северо-восточной части моря широко использовался метод полигонных исследований. В отдельных прибрежных районах (полигонах) российского сектора моря на нескольких АБС синхронно выполнялись измерения течений, которые сопровождались несколькими квазисинхронными гидрофизическими съемками с густой сеткой станций. По данным гидрофизических съемок рассчитывались карты геострофической циркуляции, а по данным измерений течений определялись их статистические параметры в отдельных точках. Такие исследования были выполнены в феврале-марте 1981 г. (нис “Профессор Штокман”), в мае-июне 1990 г. (нис “Акванавт”), в июне 1991 г. (нис “Акванавт”) и в октябре 1992 г. (нис “Витязь” и нис “Акванавт”). Результаты анализа этих натурных исследований опубликованы в многочисленных работах (Кривошея и др., 1991, 1994, 1996а,б; Овчинников и др., 1996).

Измерения придонных течений большой продолжительности (2-3 месяца) были выполнены в 15 точках на российском шельфе в 1991-99 гг. научно-исследовательским объединением “Южморгеология” (Титов, Савин, 1997). Следует также отметить исследования течений на кавказском шельфе, выполненные экспедицией ВНИРО на нис “Академик Книпович” летом 1990 г. (Ткаченко, Верхунов, Суслов, 1992).

В 1997-98 гг., в связи со строительством морского терминала Каспийского трубопроводного Консорциума, были выполнены натурные исследования прибрежных течений большой продолжительности в трех точках, расположенных на перпендикулярном к берегу разрезе в районе Южной Озереевки.

Натурные исследования, прежде всего последовательные гидрофизические съемки на полигонах с одновременными измерениями течений на автономных буйковых станциях,

свидетельствуют о том, что характер режима течений на российском шельфе определяется в основном общей циркуляцией моря.

Генеральная циркуляция вод в Черном море характеризуется циклоническим движением вод (рис. 4.1). Ее главным структурным элементом является Кольцевое циклоническое течение (КЦТ), опоясывающее все море по его периметру (прежнее название этого течения – Основное Черноморское течение (ОЧТ)). В квазистационарном состоянии КЦТ у Кавказского побережья охватывает полосу вдоль берега шириной 50-60 км и несет свои воды в генеральном направлении на северо-запад. Примерно на удалении 20-35 км от берега прослеживается ядро наибольших скоростей (стрежень потока), где скорости на поверхности моря нередко достигают 60-80 см/с. Проникновение этого течения в глубину составляет порядка 150-200 м в летний период и – 250-300 м в зимний период. В отдельных случаях, в области стрежня оно проникает до глубины 350-400 м.

Вследствие синоптической изменчивости ветра, гидродинамической неустойчивости и взаимодействия с рельефом подводного склона, КЦТ испытывает волнообразные колебания: его стрежень отклоняется то вправо, то влево от своего среднего положения, т.е. это струйное течение меандрирует (Кривошея и др., 1998; Krivosheya, Nyffeler, Yakubenko, 1998; Oguz, La Violette, Unluata, 1992). Интенсивность меандрирования КЦТ, длина волн и амплитуда меандров в различных районах моря и в разное время года различны: от слабых колебаний до почти замкнутых или очень вытянутых меандров. В теплый период года, с апреля по ноябрь, интенсивность меандрирования КЦТ больше, чем в зимний период. В конце лета и осенью его меандры могут достигать центральной части моря (Кривошея и др., 1997).

В результате, в его меандрах возникают, развиваются, а затем разрушаются вихревые структуры: слева от стрежня в циклонических меандрах образуются циклонические вихри (ЦВ), справа, в антициклонических меандрах, прибрежные антициклонические вихри (ПАВ) (Овчинников, Титов, 1990). Наибольшего развития антициклонические меандры и ПАВ достигают в летне-осенний период. В большинстве случаев они имеют форму, близкую к окружности, их геометрические размеры достигают 30-40 км, иногда – 60-80 км, а в исключительных случаях – до 100 км. Большинство ПАВ после образования перемещаются вместе с антициклоническими меандрами КЦТ в том же направлении, что и поток КЦТ. Скорость их перемещения у Кавказского побережья составляет от 2 до 6 км в сутки (Кривошея, Овчинников, Титов, 1994, 1996; Krivosheya, Nyffeler, Yakubenko, 1998). На рис. 4.2 представлена карта геострофической циркуляции по данным квазисинхронной съемки летом 1996 г. (Кривошея, Прокопов, 1997). Как следует из рисунка, во время съемки в районе Новороссийск-Туапсе присутствовали хорошо выраженные меандры КЦТ и два ПАВ.

Кроме ПАВ, которые образуются в антициклонических меандрах КЦТ, в прибрежной зоне, в результате взаимодействия потока КЦТ с формами рельефа материкового склона, шельфа и береговой линии, возникают ПАВ меньших размеров (см. рис. 4.2, р-н Туапсе-Сочи). По своим очертаниям эти ПАВ напоминают эллипсы, большие оси которых ориентированы вдоль берега и изобат. Эти вихри также перемещаются в том же направлении, что и основной поток (КЦТ). Таким образом, вся эта система (КЦТ и вихревые структуры разного знака завихренности) перемещается вдоль российского побережья в северо-западном направлении.

При прохождении ПАВ в его прибрежной части орбитальное движение воды противоположно направлению КЦТ. Поэтому направление течения на шельфе меняется на

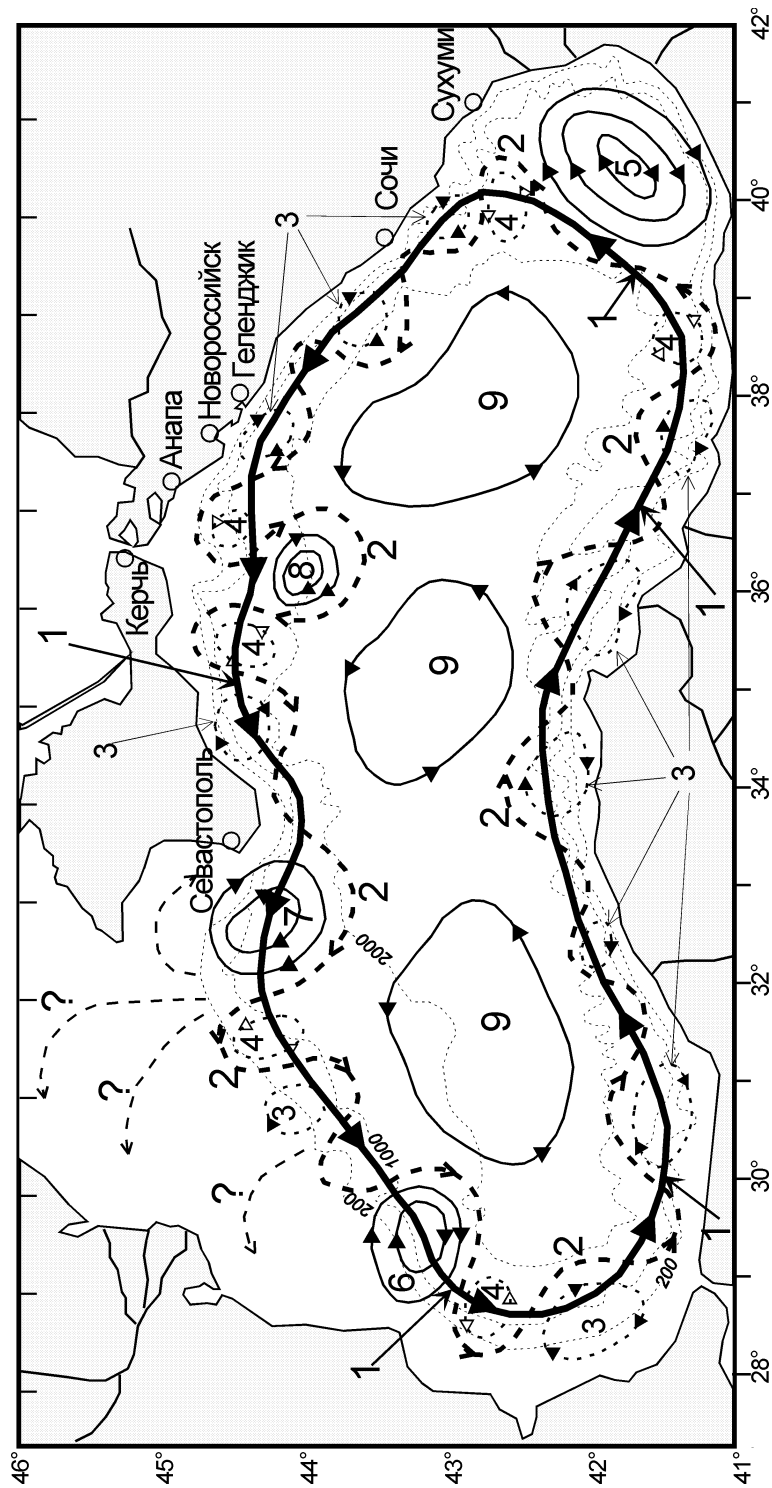


Рис. 4.1. Схема циркуляции вод Черного моря.

1 – Кольцевое циклоническое течение (КЦТ) – среднее положение стрежня; 2 – меандры КЦТ; 3 – прибрежные антициклонические вихри (ПАВ); 4 – циклонические вихри (ЦВ); 5 – Батумский антициклонический вихрь; 6 – Керченский ПАВ; 7 – Севастопольский ПАВ; 8 – Керченский ПАВ; 9 – квазистационарные циклонические круговороты

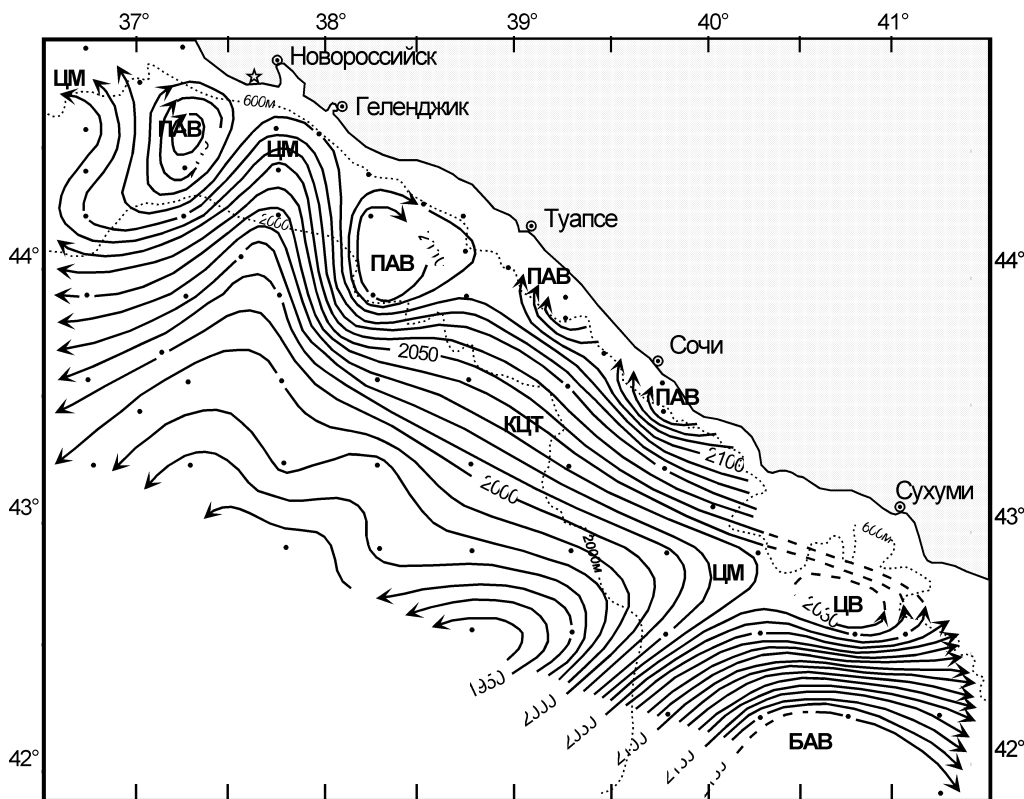


Рис. 4.2. Геострофическая циркуляция вод на поверхности моря относительно изобарической поверхности 500 дб по данным съемки нис “Янтарь” 25.06-06.07.96 г. (Кривошея, Прокопов, 1997)

диаметрально противоположное (юго-восточное) и сохраняется на весь период прохождения ПАВ. После прохождения ПАВ на шельфе восстанавливается прежнее северо-западное направление.

Благодаря воздействию ПАВ, режим течений на шельфе российского сектора моря характеризуется эпизодической сменой северо-западного (западного) направления на юго-восточное (восточное) и, наоборот, т.е. поток вод на шельфе совершает возвратно-поступательные (реверсивные) движения, ориентированные вдоль береговой линии (бимодальный режим течений).

Кроме отмеченных выше вихревых структур, на российском шельфе от мыса Утриш до Сочи (побережье с узким шельфом) иногда могут возникать ситуации, когда на шельфе большой протяженности (120 и более км) несколько дней непрерывно прослеживается поток, направленный в противоположном направлении (на юго-восток) относительно КЦТ. Это происходит в результате формирования сильно вытянутого вдоль побережья поля антициклонической завихренности, которая проявляется на шельфе в виде непрерывного противотечения основному потоку (КЦТ).

В этой главе представлены результаты перечисленных выше натурных исследований в прибрежной зоне российского сектора моря. Основные особенности циркуляции вод и

течений на шельфе обсуждаются далее на базе наиболее информативных натурных экспериментов.

4.2. Анализ результатов натурных экспериментов

Эксперимент-91. Длительные измерения течений на АБС в четырех точках шельфа между Новороссийском и Туапсе проведены в июне 1991 г. Все АБС были установлены в районе изобаты 50 м. АБС 1 располагалась к западу от Новороссийска у п. Южная Озереевка, АБС 2 – у Геленджика, АБС 3 – у п. Бетта и АБС 4 – у п. Ольгинка. Расположение АБС показано на врезке рис. 4.3а. Продолжительность измерений составила на АБС 1 и 2 21 сутки, на АБС 3 – 20 суток, на АБС 4 – 15 суток.

Во время измерения течений на АБС в прибрежной 40-километровой зоне между Новороссийском и п. Ольгинка (АБС 4) были выполнены три квазисинхронные гидрофизические съемки: 13-15.06, 18-20.06 и 01-03.07.1991 г.

Как следует из анализа диаграмм эмпирических вероятностей направления течений ($P\alpha\%$) на горизонте 10 м (см. рис. 4.3), во всех 4-х точках преобладали вдольбереговые течения двух противоположных секторов: северо-западного (в сторону Новороссийска) и юго-восточного (в сторону Туапсе). Как уже отмечалось, такой режим течений называют бимодальным. Заметная асимметрия диаграмм к северо-западу указывает на 3-4-х-кратное преобладание течений северо-западного сектора над течениями юго-восточного сектора. Об этом свидетельствуют и векторы осредненного течения, показывающие генеральный перенос вод в северо-западном направлении. Обращает на себя внимание четкое согласование диаграмм и направления средних векторов с ориентировкой береговой линии вблизи точек измерений (см. рис. 4.3а, врезка).

Последовательность средних суточных векторов течения (см. рис. 4.3б) показывает время начала, окончания и действия ПАВ. За время измерений с 30.05 по 02.07.91 г. было зафиксировано два ПАВ. Первый из них наблюдался с 08.06 по 12.06.91 г. на АБС 2 (район Геленджика) и частично – на АБС 1 (Южная Озереевка), которая была установлена позднее (10.06.91 г.), уже во время действия вихря (АБС 3 и 4 установлены после прохождения вихря). Второй ПАВ в исследуемом районе побережья действовал с 21.06 по 26.06.91 г. и зафиксирован на АБС 1, 3 и 4 (АБС 2 закончила работу раньше – 19.06.91 г.).

Как видно из рис. 4.3б, при прохождении ПАВ северо-западное течение на всех АБС почти синхронно совершало резкий поворот на 180° (на юго-восток). После прохождения ПАВ течение так же быстро изменяло свое направление с юго-восточного на северо-западное. При этом, в обоих случаях смена направления течений происходила реверсивно: скорость течения северо-западного направления уменьшалась до нуля, затем возникало течение юго-восточного направления. То же самое происходило и при обратной смене течений.

Во время всего периода измерений (с 30.05 по 02.07.91 г.) средняя скорость (см. рис. 4.3а, толстые стрелки в центрах диаграмм) составляли 10 см/с в районе Южной Озереевки (АБС 1) и в районе Геленджика (АБС 2), 20 см/с – в районе Бетты (АБС 3) и 15 см/с – в районе Ольгинки (АБС 4). Средние суточные значения скорости нередко достигали 50 см/с, а максимальные из наблюдаемых – 75 см/с (АБС 3).

Геострофическая циркуляция, рассчитанная по данным трех гидрофизических съемок, свидетельствует о том, что во время первой съемки (13-15 июня) на шельфе уже закончилась смена юго-восточного течения на северо-западное. Но скорости последнего течения

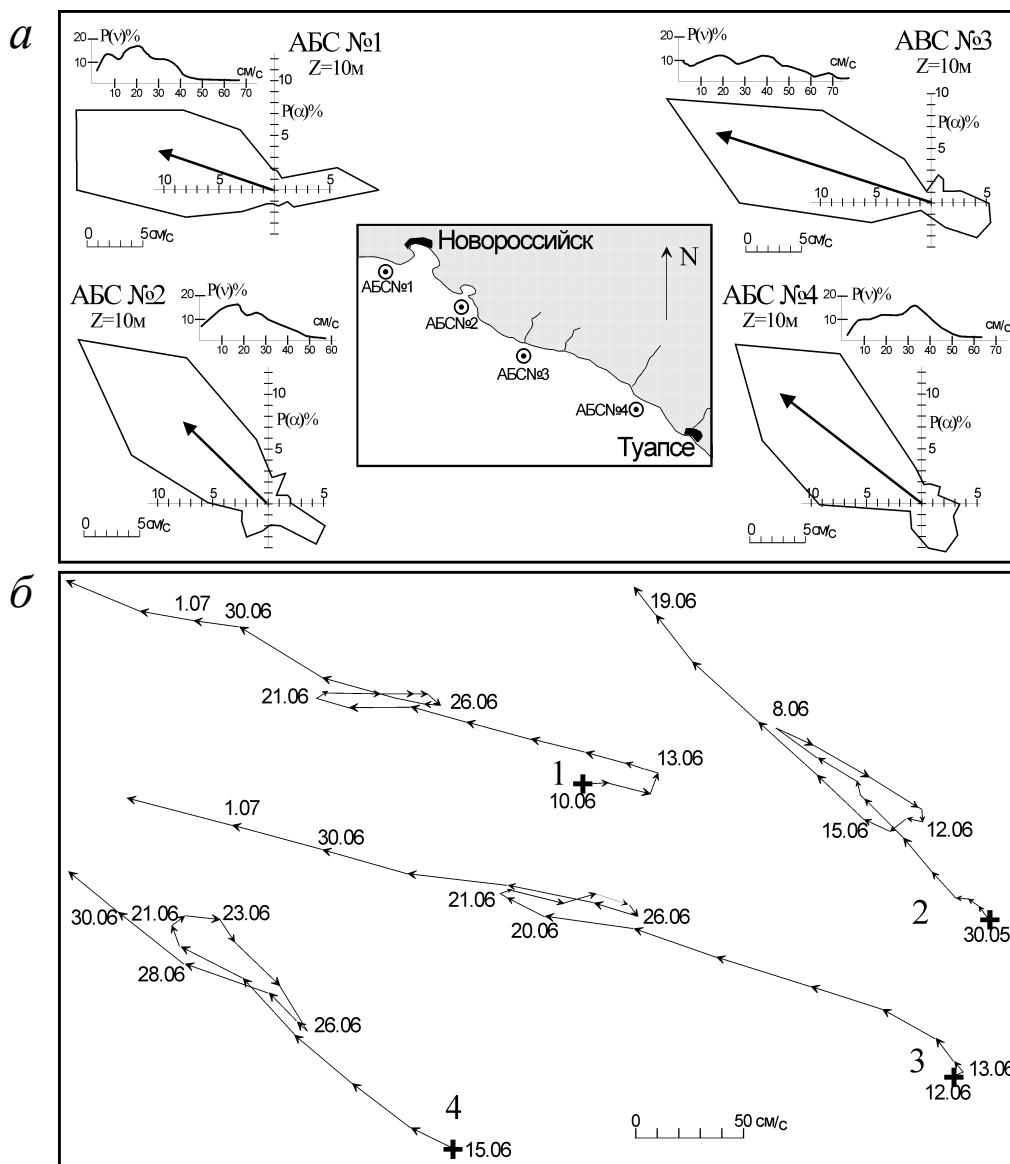


Рис. 4.3. Диаграмма распределения эмпирических вероятностей направления течения ($P(\alpha)\%$) и гистограммы скорости течения ($P(v)\%$) по данным 4-х АБС в июне 1991 г. (а); последовательность средних суточных векторов течений на горизонте 10 м (б). Толстые стрелки в центрах диаграмм – средние за весь период измерений векторы течения

были еще небольшими (5-10 см/с, см. рис.4.3 – АБС 1 и 2). При этом, как свидетельствует динамическая карта, северо-западное течение наблюдалось только на шельфе. Мористее, над верхней частью материкового склона, наблюдалась циркуляция в виде слабых антициклонических вихрей и только на удалении 15-20 км от берега появлялось северо-за-

падное течение – периферия КЦТ, стрежень которого находился за пределами 40-километрового полигона.

По данным последующих съемок (18-20.06 и 01-03.07), вся прибрежная 40-километровая зона, включая шельф, находилась под прямым воздействием КЦТ, стрежень которого находился примерно в 20-30 км от берега. Во время этих съемок среднесуточные значения скорости северо-западного течения на некоторых АБС достигали 30-40 см/с (см. рис. 4.36).

Результаты анализа экспериментальных данных, полученных на 4-х АБС с 30 мая (АБС 2) по 2 июля 1991 г. (АБС 1), свидетельствуют о том, что за 33 суточный период наблюдений на участке шельфа от Новороссийска до Туапсе дважды возникали ПАВ. Они имели вид очень вытянутых вдоль берега эллипсов, большие оси которых превышали расстояние между крайними АБС 1 и 4 (110 км), а малые оси, по данным первой гидрофизической съемки, составляли 20-25 км. Эти вихри в отличие от многих других ПАВ были малоподвижны. Об этом свидетельствует почти синхронная смена северо-западного направления течения на юго-восточное и юго-восточного – на северо-западное на всех 4-х АБС. В сумме продолжительность течения северо-западного направления между Новороссийском и Туапсе за весь период измерений составила 24 суток, юго-восточного – 9 суток.

Полигонный эксперимент-92. Осенью 1992 г. был проведен очередной полигонный эксперимент с измерениями течений на АБС. На полигоне 45х90 км были установлены 5 АБС (рис.4.4) и выполнено 10 параллельных гидрофизических разрезов через 9-10 км, ориентированных по нормали к берегу. АБС 1 и 3 были установлены в стрейне КЦТ, 2 – мористее его, а 4 и 5 – в зоне прибрежной антициклонической завихренности. Трижды за время эксперимента проводились гидрофизические съемки (табл. 4.1). На каждом разрезе выполнялось по 6 станций.

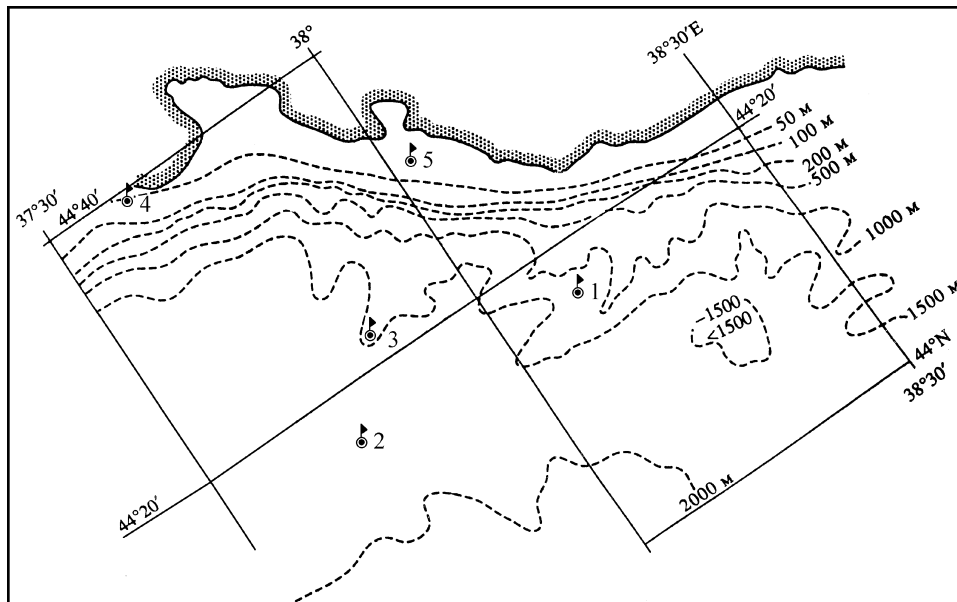


Рис. 4.4. Рельеф дна и расположение якорных АБС на гидрофизическом полигоне 27.09-21.10.92 г.

Таблица 4.1.

**Сведения об экспериментальных исследованиях нис “Витязь” и нис “Акванавт”
русского побережья 27.09-21.10.92 г.**

Измерения течений; съемки	Время: начало-конец	Глубина, м	Горизонты измерений, м	Судно
АБС-1	27.09-16.10.92	1340	15, 50, 100	“Витязь”
АБС-2	27.09-16.10.92	1900	15, 50, 100	“Витязь”
АБС-3	27.09-15.10.92	1540	15, 50, 100, 300, 500	“Витязь”
АБС-4	03.10-21.10.92	50	15	“Акванавт”
АБС-5	03.10-21.10.92	50	15	“Акванавт”
Съемка № 1	03.10-05.10.92		0-300	“Акванавт”
Съемка № 2	09.10-10.10.92		0-300	“Акванавт”
Съемка № 3	15.10-17.10.92		0-300	“Витязь”

По данным трех съемок рассчитаны карты геострофической циркуляции (рис. 4.5). Из карты первой съемки (03.10-05.10.92) следует, что в районе Новороссийска-Геленджика находилась восточная часть сильно вытянутого вдоль берега ПАВ с центром западнее Новороссийска. Западная часть этого вихря находилась за пределами полигона. Большая ось вихря составляла примерно 80 км, а малая – порядка 15-18 км.

Во время второй съемки (09.10-10.10.92) в пределах полигона присутствовала лишь тыловая часть ПАВ, что свидетельствует о его перемещении за время между съемками (5 суток) на запад. Скорость перемещения составила примерно 8 км в сутки (9 см/с). Ко времени третьей съемки (через 6 суток) ПАВ полностью вышел за пределы полигона, поэтому на карте геострофической циркуляции (см. рис.4.5, 15.10-17.10.92) он полностью отсутствует. В то же время появились признаки приближения с востока нового ПАВ, о чем свидетельствует тенденция прибрежных изолиний динамической топографии к повороту в обратном направлении и повернувшее на юго-восток течение на АБС 5 вблизи Геленджика.

На левой, мористой периферии КЦТ во время первой съемки никаких возмущений в поле течений не наблюдалось. На карте второй съемки на меридиане Геленджика появилась вершина циклонического меандра КЦТ (возможно, северная периферия циклонического вихря). За 6 суток между второй и третьей съемками этот меандр переместился вдоль берега в северо-западном направлении на 40 км, средняя скорость его движения составляла 6,7 км/сутки.

Принципиальные различия режимов течений на шельфе в зоне антициклонической завихренности и в районе действия КЦТ хорошо видны на диаграммах распределения вероятностей направления течений (рис. 4.6а). На шельфе (АБС 4 и 5) диаграммы вытянуты вдоль линии берега и характеризуются бимодальным режимом. В точке 4 модальными секторами являются 260-320° и 80-100° (табл. 4.2), а в точке 5 – 300-340° и 180-200°. Ориентировка модальных секторов определяется направлением береговой линии. При прохождении ПАВ скорости течений на шельфе иногда уменьшаются до нулевых значений (ниже чувствительности датчика скорости), вероятность которых указана цифрами в центрах диаграмм (см. рис.4.6а). Диаграммы направления в зоне действия КЦТ (АБС 1, 2 и 3) имеют мономодальный режим. Как следует из таблицы 4.2, в верхнем 50-метровом слое потока КЦТ это – сектор 280-300°.

Временная изменчивость течения характеризуется соотношением между его квазипостоянной и вихревой составляющими. На рис. 4.6б квазипостоянная составляющая в

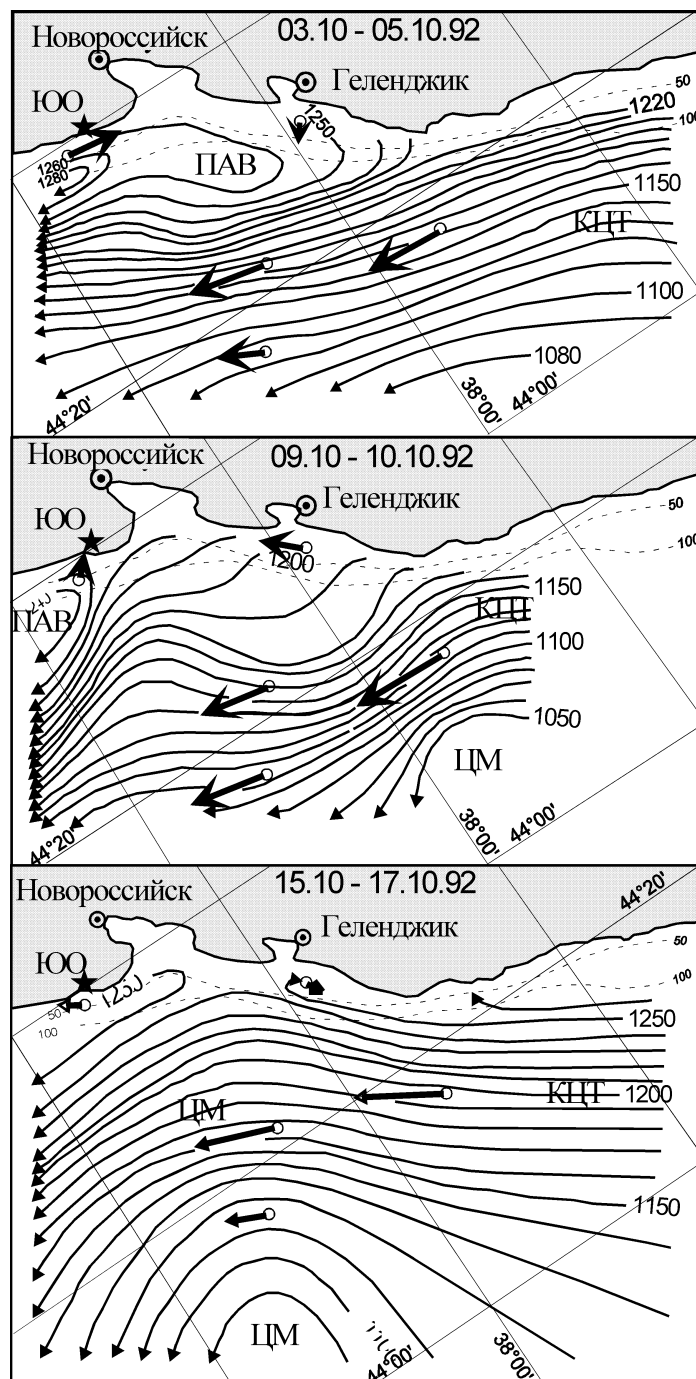


Рис. 4.5. Геострофическая циркуляция на поверхности моря относительно изобарической поверхности 300 дб по данным трех съемок в октябре 1992 г. Толстые стрелки – средние векторы течения по данным АБС во время каждой съемки

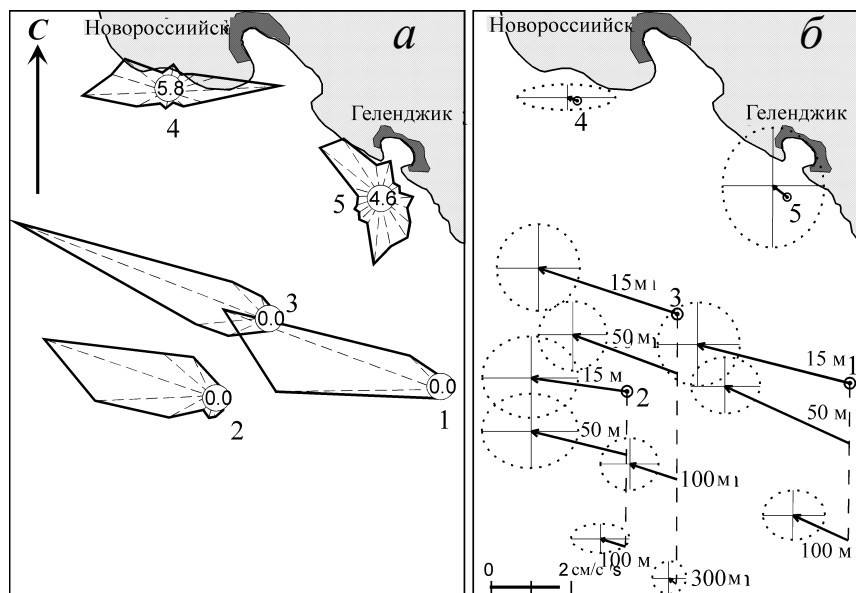


Рис. 4.6. Диаграммы распределения вероятностей направления течения на горизонте 15 м (а) и средние за время измерений векторы течения (б) в октябре 1992 г. (Кривошея и др., 1996). Цифры в центрах диаграмм показывают вероятность “нулевых” скоростей, пунктиром обозначены области изменчивости (стандартные отклонения) векторов течений

Таблица 4.2.

Статистические характеристики течений в зонах ПАЗ и КЦТ 27.09-21.10.91

№ АБ С	z, м	$\bar{\alpha}^\circ$	\bar{V} , см/с	$\sigma(V)$, см/с	$V_{\text{макс}}$, см/с	$V_{\text{мод}}$, см/с	$P(V)$ мод, %	Модальные направления				K_v
Зона ПАЗ												
4	15	311	1.0	15.0	43	1-5	26.0	261-320	36.6	81-100	24.4	15.0
5	15	305	5.0	22.3	73	6-10	20.2	301-340	29.8	181-200	10.8	4.5
Зона КЦТ												
1	15	284	47,0	15,9	80	46-50	21,5	281-300	50,4	-	-	0,3
	50	295	39,6	12,9	65	41-45	21,3	281-300	55,7	-	-	0,3
	100	296	19,2	11,5	38	21-25	23,7	281-300	31,6	-	-	0,6
2	15	282	28.2	18.2	67	21-25	18.4	281-300	38.1	-	-	0.7
	50	281	28.1	17.7	67	26-30	18.8	281-300	38.3	-	-	0.6
	100	289	8.8	8.9	32	1-5	25.0	261-280	25.6	81-100	4.6	1.0
3	15	287	44.4	17.2	77	41-45	21.5	281-300	58.9	-	-	0.4
	50	291	33.8	12.7	58	36-40	24.3	281-300	36.4	-	-	0.4
	100	285	18.2	11.1	43	16-20	26.6	281-300	36.2	-	-	0.6
	300	283	2.0	7.0	21	1-5	38.3	261-280	14.2	1-20	12.2	3.4
	500	28	1.1	6.4	24	1-5	45.3	261-340	26.6	81-100	26.6	6.0

Примечание. z – горизонт; $\bar{\alpha}^\circ$ и \bar{V} – направление и модуль среднего вектора скорости течения за время измерений; $\sigma(V)$ – среднеквадратичное отклонение скорости течения; $V_{\text{макс}}$ – максимальная измеренная скорость; $V_{\text{мод}}$ и $P(V)_{\text{мод}}$ – модальный диапазон скорости течения и его вероятность в процентах; $\alpha_{\text{мод}}^\circ$ – модальные 20-градусные сектора направления течения (1-я и 2-я моды) и их эмпирические вероятности $P(\alpha^\circ)$ в процентах; K_v – коэффициент вариации.

точках постановки АБС представлена средним вектором за время измерений течений, а переменная – эллипсом (на конце каждого вектора), оконтуривающим область среднеквадратичных отклонений единичных векторов течения. В зоне КЦТ (АБС 1,2,3) вектор среднего течения превышает по величине значения стандартных отклонений, что свидетельствует о малой изменчивости течения. В зоне прибрежной антициклонической завихренности (ПАЗ) значения среднеквадратичных отклонений многократно превышают величину среднего вектора течения, что указывает на большую изменчивость течений как по скорости, так и по направлению.

В таблице 4.2 приведены статистические характеристики течений по данным измерений на АБС. Как следует из таблицы, направления осредненных течений (средний вектор) как на шельфе (АБС 4 и 5), так и в зоне КЦТ (АБС 1,2 и 3) на горизонте 15 м различаются незначительно: от 285° (АБС 2) до 311° (АБС 4). В зоне КЦТ средние направления на одинаковых горизонтах всех АБС очень близки и различаются менее, чем на 10° .

Наиболее высокие значения средней, модальной и максимальной скорости течений наблюдались в зоне КЦТ. Наименьшие скорости зафиксированы вблизи берега, на АБС 4 и 5 (см. табл. 4.2). Здесь скорости осредненного течения, а следовательно, и перенос вод в генеральном направлении (северо-запад) примерно на порядок ниже, чем в стрекне КЦТ. Столь низкая средняя скорость на шельфе объясняется осреднением возвратно-поступательных движений, обусловленных ПАВ.

Важной характеристикой режима течений является соотношение между средним квадратичным отклонением $\sigma(V)$ и средним вектором скорости \bar{V} (коэффициент вариации). Средняя скорость характеризует квазистационарную часть течения, а среднее квадратичное отклонение – его переменную часть. Если соотношение $\sigma(V)/\bar{V} < 1$, то изменчивость течения невелика и направление его изменяется в пределах некоторого сектора. При соотношении $\sigma(V)/\bar{V} > 1$ режим течения характеризуется интенсивной временной изменчивостью, причем, направление течения изменяется в пределах всего круга (360°).

Для верхнего 100-метрового слоя КЦТ характерны небольшие значения коэффициентов вариации течений (0,3-0,6), что дает основание считать КЦТ мощным струйным течением. В прибрежной зоне из-за действия ПАВ коэффициенты вариации течений многократно возрастают (от 4,5 до 15,0), что свидетельствует о большой неустойчивости течений на шельфе.

Эксперимент Южная Озереевка 97-98. В 1997-98 гг. Южным отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук выполнены два продолжительных периода измерений течений в районе поселка Южная Озереевка в трех точках вдоль створа, расположенного по нормали к берегу (18 км к западу от входа в Цемесскую бухту). Местоположение точек показано на рис. 4.7. Береговая линия на исследуемой акватории имеет генеральное направление “запад-восток” с небольшим изгибом в сторону суши в районе устья реки Озерейки. Такой же изгиб имеют изобаты 10 и 20 м. Удаление точек от берега составляет: точка 1 – 4,3 км, точка 2 – 1,1 км, точка 3 – 0,2 км. Измерения выполнялись с сентября 1997 г. по февраль 1998 г. (первый период) и с августа по декабрь 1998 г. (второй период). Для измерений использовались акустические измерители течений 3Д-АСМ (Three-Dimensional Acoustic Current Meter). В точках 1 и 2 измерители устанавливались на полупритопленной АБС, а в точке 3 измеритель крепился в специальной треноге. Дискретность измерений составляет 30 минут.

Общее представление о характере временной и пространственной изменчивости течений в реальном времени на исследуемом участке шельфа дают фрагменты временной

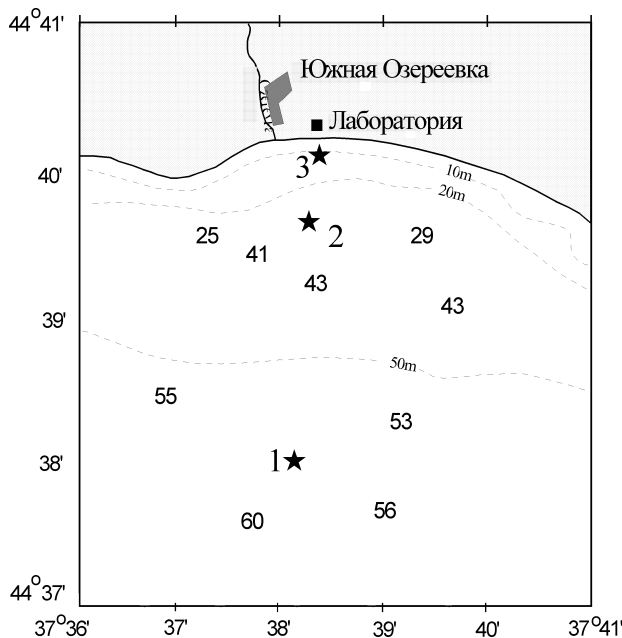


Рис. 4.7. Местоположение точек (АБС) измерений течений (сентябрь 97 – февраль 98, август-декабрь 98)

последовательности векторов течений в трех точках, представленные на рис. 4.8 и 4.9. Векторы нанесены через 30 минут на ось времени, ориентированную в направлении “север-юг” (перпендикулярно к береговой линии). Как следует из этих рисунков, на исследуемой акватории преобладали течения вдольберегового направления на запад или восток, которые охватывали всю толщу вод до дна. При этом изменения течения на противоположное направление происходили довольно быстро и почти синхронно на всех горизонтах. Из рисунков также видно, что векторы во всех точках имели чаще всего одинаковые направления. Однако наблюдались случаи, когда вблизи берега (в точке 2 и особенно в точке 3) тече-

ние имело противоположное (нежели в точке 1) направление. Наибольшая изменчивость по направлению наблюдалась в прибрежном мелководье (точка 3).

Как следует из рис. 4.8, с 20 по 22 декабря 1997 г. в точке 1 на всех горизонтах имело место устойчивое течение западного направления (такая ситуация наблюдалась с 16 декабря). Течение этого направления начало ослабевать 22 декабря, а в конце суток его вектор скорости стал вращаться вправо и через несколько часов произошла смена течения с западного на восточное направление. Обратная смена течения с восточного на западное направление в этой точке произошла 26 декабря. В точке 2 с 20 по 22 декабря тоже имело место западное (юго-западное) течение, но оно было слабее и менее устойчиво по направлению, особенно в поверхностном слое (см. рис. 4.8). В этой точке, так же как в точке 1, в конце суток 22 декабря произошла его смена на восточное направление. В точке 3 с 20 по 23 декабря включительно наблюдалась частая реверсивная смена течения в направлении запад-восток и обратно.

Несколько иная ситуация представлена на рис. 4.9. На протяжении четырех суток с 24 по 27 сентября 1998 г. поле течений на этой акватории формировалось проходящими ПАВ небольших размеров (порядка 3-5 км). Один из таких вихрей очень четко прослеживался 25 сентября (см. рис. 4.9). В это время в точке 1 (удаление от берега – 4,3 км) течение было направлено на запад, а в точках 2 (удаление – 1,1 км) и 3 (удаление – 0,2 км) течение имело восточное направление. Расстояние между точками 1 и 2 составляло 3,2 км.

Статистические характеристики течений, измеренных в 1997-98 гг., представлены в таблице 4.3. Средняя за период измерений скорость течения на поверхности моря составляла: в точке 1 – 11 см/с, во время первого периода и 14,6 см/с – во время второго; в точке 2 – 1,3 см/с во время первого периода и 8,8 см/с во время второго. В придонном слое

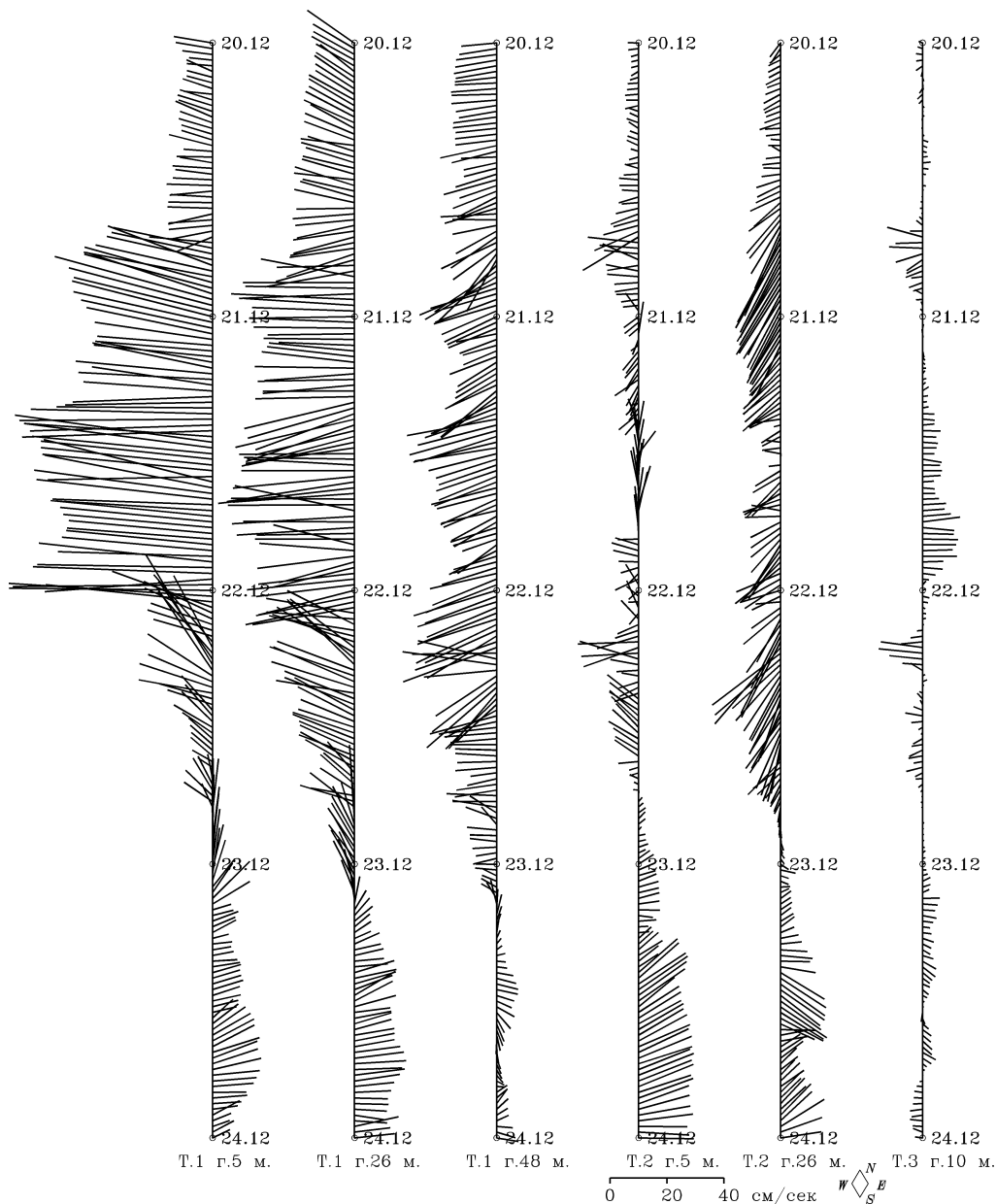


Рис. 4.8. Фрагмент временной последовательности получасовых векторов течения с 20 по 23 декабря 1997 г. Точка 1 – горизонты 5, 26 и 48 м; точка 2 – горизонты 5 и 26 м; точка 3 – горизонт 10 м.

(горизонт 5 м от дна в точках 1 и 2 и 1 м – в точке 3) ее значения составляли: в точке 1 – 5,3 см/с, в первом периоде и 4,8 см/с, во втором; в точке 2 – 3,4 см/с в первом периоде и 2,3 см/с во втором; в точке 3 – 0,4 см/с в первом периоде и 1,3 см/с во втором. Векторы средней скорости в оба периода имели западное или юго-западное (в придонном слое)

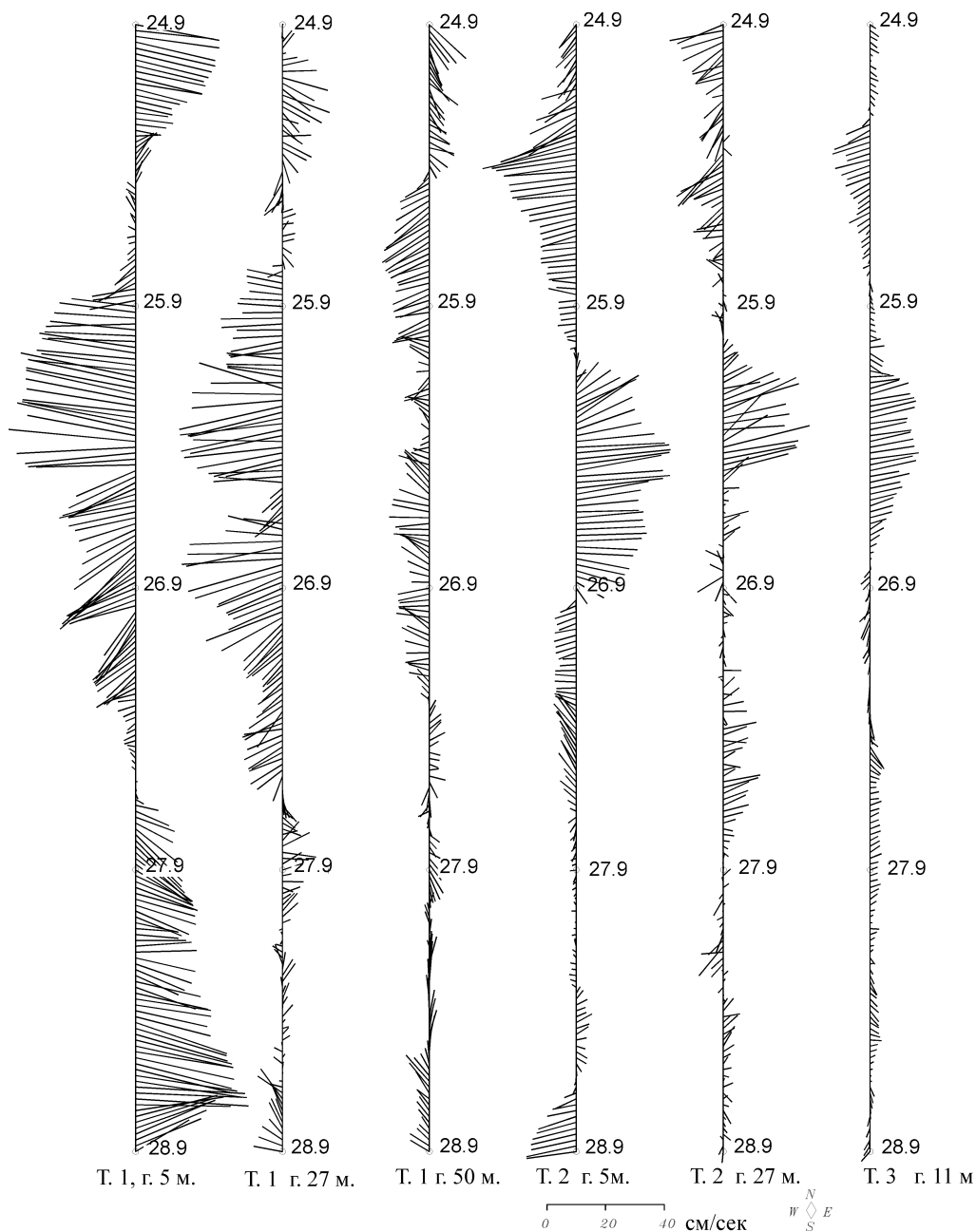


Рис. 4.9. Фрагмент временной последовательности получасовых векторов течения с 24 по 27 сентября 1998 г. Точка 1 – горизонты 5, 27 и 50 м; точка 2 – горизонты 5 и 27 м; точка 3 – горизонт 11 м.

направление, за исключением точки 3. Здесь во время второго периода средний вектор имел восточное направление.

Максимальные скорости течений достигали в поверхностном слое 70-80 см/с в точке 1 и 40-50 см/с в точке 2. В большинстве своем максимальные скорости наблюдались при западном направлении течений, только в точке 2 во время первого периода максимальные скорости наблюдались при восточном направлении (101°). В придонном слое максимальные значения скорости составляли 50-60 см/с в точке 1, 30-35 см/с в точке 2 и 23-24 см/с в точке 3. В точках 1 и 2 вектор максимальной скорости в придонном слое имел юго-западное направление, а в точке 3 – западное во время первого периода и юго-восточное во время второго.

Как следует из таблицы 4.3, модальные значения (наиболее часто повторяющиеся) скорости на поверхности моря в подавляющем большинстве были в диапазоне 5-10 см/с, а в придонном слое – 0-5 см/с. Исключение составляет горизонт 26 м в точке 1, где во время первого периода измерений значения модальной скорости находились в диапазоне 10-15 см/с.

Таблица 4.3.

Статистические характеристики течений

№ Т.	z, м	$\bar{\alpha}^0$	\bar{V} , см/с	$\sigma(V)$, см/с	$V_{\text{макс}}$ см/с	α^0 макс	$V_{\text{мод.}}$ см/с	$P(V)$ <div>мод. %</div>	Модальные направления				K_b
									1-я мода α^0	$P_1(\alpha^0)$ %	2-я мода α^0	$P_2(\alpha^0)$ %	
1-й период измерений: сентябрь 97 - февраль 98													
1	5	274	11.0	20.6	72	273	5-10	21.4	260-280	272	100-120	6.3	1.9
	26	279	13.8	17.0	64	266	10-15	18.5	160-280	28.5	80-100	3.3	1.2
	48	262	5.3	12.5	61	262	5-10	33.2	260-280	18.9	80-100	6.4	2.4
2	5	266	1.3	9.6	38	101	5-10	38.8	260-280	12.5	80-100	8.8	7.4
	26	224	3.4	8.4	36	221	0-5	45.7	220-240	17.5	80-100	5.9	2.5
3	10	264	0.4	4.4	24	294	0-5	74.2	260-280	12.6	80-100	9.4	11.0
2-й период измерений: август-декабрь 98													
1	5	272	14.6	19.8	83	279	5-10	18.0	260-280	34.1	100-120	4.8	1.4
	27	269	8.8	18.3	71	264	5-10	26.4	260-280	24.1	80-100	7.1	2.1
	50	247	4.8	12.5	51	254	5-10	29.5	240-260	15.3	100-120	8.2	2.6
2	5	274	3.4	9.6	50	287	0-5	42.5	260-280	16.9	80-100	8.6	2.8
	27	253	2.3	6.9	32	252	0-5	53.4	240-260	14.8	60-80	7.1	3.0
3	11	109	1.3	5.1	23	147	0-5	62.6	220-240	4.9	60-80	11.3	3.9

Примечание. Т. - точка; z - горизонт; $\bar{\alpha}^0$ и \bar{V} - направление и модуль среднего вектора скорости течения за время измерений; $\sigma(V)$ - среднее квадратическое отклонение скорости течения; $V_{\text{макс}}$ - максимальная измеренная скорость; $\alpha^0_{\text{макс}}$ - направление максимальной скорости; $V_{\text{мод}}$ и $P(V)_{\text{мод}}$ - модальный диапазон скорости течения и его вероятность Р в процентах; $\alpha^0_{\text{мод}}$ - модальные 20-градусные сектора направления течения (1-я и 2-я моды) и их эмпирические вероятности $P(\alpha^0)$ в процентах; K_v - коэффициент вариации.

О характере изменчивости течений свидетельствуют вероятности направления, вычисленные по 20-градусным секторам. Нет ни одного сектора в обоих периодах, где бы вероятность течения равнялась нулю. Это значит, что направление течения во всех трех точках и на всех горизонтах за оба периода изменялось в пределах всего круга (360°). Однако распределение вероятностей по секторам было неравномерным. Наибольшая вероятность течений в большинстве случаев наблюдалась в двух диаметрально противоположных направлениях: западном (240-260° и 260-280°) и восточном (60-80°, 80-100° и 100-120°).

В придонном слое точки 2 (горизонты 26 и 27 м) заметно сказывается влияние дна, здесь наибольшая повторяемость направления отмечалась в секторе 220-240° во

время первого периода и 240-260° во время второго. Преобладание течений западных и восточных направлений за оба периода измерений наглядно демонстрирует диаграмма вероятностей направления по 20-градусным секторам (рис. 4.10). В точках 1 и 2 течения западных секторов существенно преобладали над течениями восточных. В точке 3, которая располагалась в 0,2 км от уреза воды, повторяемость течений западного и восточного направлений была равновероятной.

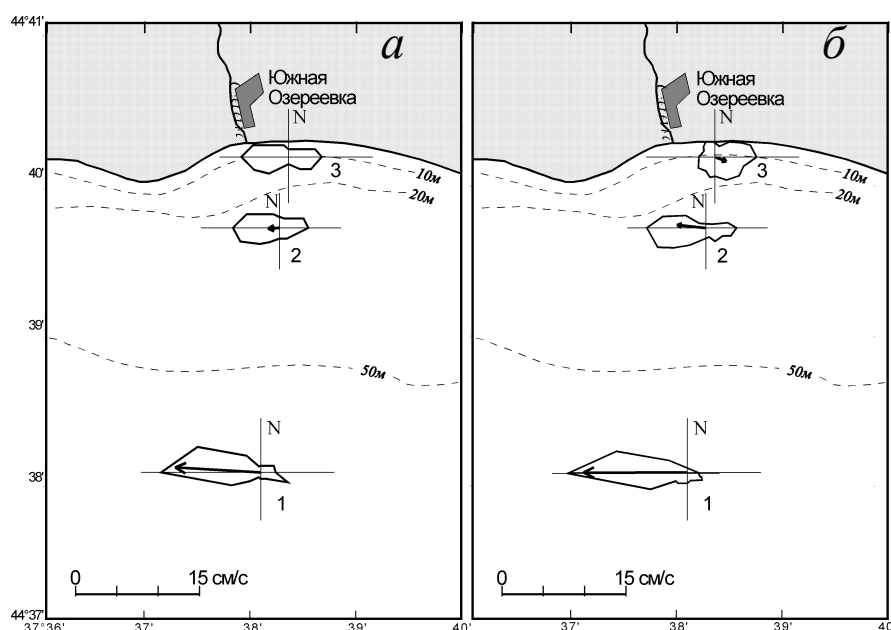


Рис. 4.10. Диаграммы распределения вероятностей направления течения: сентябрь 1997 - февраль 1998 гг. (а), август-декабрь 1998 г. (б) Толстые стрелки в центрах диаграмм - средние за период измерений векторы течения.

В целом, изменчивость течений на исследуемой акватории хорошо характеризует коэффициент вариации (K_v). Как следует из таблицы 4.3, на всех горизонтах всех точек K_v больше 1 и изменяется от 1,2 до 11,0. Самая большая изменчивость наблюдалась во время первого периода измерений на горизонте 5 м точки 2 ($K_v = 7,4$) и горизонте 10 м точки 3 ($K_v = 11,0$), наименьшая – на всех горизонтах точки 1 ($K_v = 1,2-2,6$).

Определенный интерес представляют данные о вероятности течений за оба периода по 90-градусным секторам (см. табл.4.4). Как следует из таблицы, в точке 1, наиболее удаленной от берега, в поверхностном слое (горизонт 5 м) повторяемость течений западного сектора превышает повторяемость течений восточного сектора более, чем в 4 раза, а в точке 2 – только в 2 раза. В придонном слое точки 1 повторяемость течений западного сектора превышает повторяемость течений восточного сектора в 2,4 раза, в точке 2 – в 1,8 раза. В точке 3 повторяемость течений восточного сектора несколько превышает повторяемость течений западного сектора. Следовательно, вблизи уреза воды перенос вод вдоль берега на запад и на восток близок к равновероятному.

Что же касается переноса вод в северном (в сторону берега) и южном (в сторону моря) направлениях, то в точке 1 преобладает небольшой перенос вод в сторону берега; в по-

Таблица 4.4.

Повторяемость (%) направлений течения по 90-градусным секторам

Точки		1		2		3	Перенос вод
Сектор	Горизонт(м)	5	48(50)	5	26(27)	10(11)	
Западный (226-315)°		66,2	51,0	47,5	42,8	29,4	Вдоль берега на запад
Восточный (46-135)°		15,0	22,4	25,8	21,2	35,3	Вдоль берега на восток
Северный (316-45)°		10,2	13,8	13,2	14,6	16,8	К берегу
Южный (136-225)°		8,6	12,8	13,5	21,4	18,6	От берега

верхностном слое точки 2 наблюдается баланс притока и оттока вод; в придонном слое точек 2 и 3 преобладает отток вод в южном направлении.

Результаты анализа экспериментальных данных, полученных в 1997-98 гг., свидетельствуют, что главной особенностью режима течений на исследуемом участке шельфа являются вдольбереговые течения двух противоположных направлений (запад – восток). При этом, смена одного направления на противоположное и обратно происходит довольно быстро, за 2-4 часа. Во время такой смены скорости течения резко уменьшаются и затем в большинстве случаев отмечается правый поворот вектора. На внешней части шельфа (глубина 50-60 м) перенос вод вдоль берега в западном направлении в несколько раз превышает перенос вод в восточном направлении. Ближе к берегу разность между повторяемостью противоположно направленных переносов вод уменьшается и вблизи береговой линии (глубина 10-15 м) перенос вод в противоположных направлениях почти равновешиваются.

Отмеченные выше особенности режима течений характерны не только для шельфа района Новороссийска, но и для шельфа всего Северо-Кавказского побережья, где его ширина небольшая (6-10 км). Об этом свидетельствуют данные, приведенные в работах (Овчинников и др., 1996; Титов, Савин, 1997; Ткаченко, Верхунов, Суслов, 1992). Что же касается широкого шельфа от Анапы до Керченского пролива, где расстояние от берега до изобаты 100 м составляет 25-35 км, то, к сожалению, экспериментальных данных о течениях в этом районе нет. Здесь в формировании режима течений возрастает роль ветровых условий.

Анализ данных натурных экспериментов позволяет сделать следующие основные выводы

1. Главной особенностью течений на российском шельфе Черного моря является их бимодальный характер – перенос вод вдоль берега в двух диаметрально противоположных направлениях: северо-западном (западном) и юго-восточном (восточном). При этом, северо-западное направление преобладает над юго-восточным как по повторяемости направлений, так и по величине скорости. Средний вектор течения за продолжительные (более 6 месяцев) периоды на большей части шельфа всегда направлен на северо-запад и в конкретном районе его направление согласуется с направлением береговой линии.

2. Бимодальный режим течений формируется в результате возникновения на прибрежной периферии КЦТ прибрежных антициклонических вихрей (ПАВ) различного масштаба.

3. В зоне от берега до глубин 10-15м повторяемость течений двух противоположных направлений близка к равновероятной. При удалении от берега повторяемость течений

северо-западного направления увеличивается и на внешней части шельфа (глубина 50-100 м) повторяемость северо-западного направления превышает повторяемость юго-восточных течений в несколько раз. На удалении 10-15 км от берега (глубина 500-600 м) режим течений становится мономодальным – в подавляющем большинстве случаев течения направлены вдоль берега на северо-запад.

4. Бимодальный режим течений на российском шельфе в пределах 100-метровой изобаты можно считать квазистационарным. Поэтому статистические характеристики, полученные по длительному ряду измерений (не менее года) в какой-либо точке шельфа, расположенной в районе от Анапы до Адлера (ширина шельфа – от 5 до 10 км), будут представительными для всех точек района, расположенных на той же глубине. Что же касается широкого шельфа от Керченского пролива до Анапы, то, к сожалению, экспериментальных данных о течениях в этом районе очень мало. Сделать какие-либо выводы о режиме течений на этой акватории невозможно. Можно только заметить, что здесь в формировании режима течений возрастает роль ветра.

4.3. Роль течений и циркуляции вод в экологии российского шельфа Черного моря

Роль течений и циркуляции вод в экологии шельфа состоит главным образом в транспортировке загрязненных вод от источников загрязнения, расположенных на берегу и шельфе, их турбулентном перемешивании, разбавлении и уменьшении концентрации загрязняющих веществ, способствуя тем самым более быстрой их утилизации. Наибольшая интенсивность горизонтального и вертикального перемешивания происходит в стрессе КЦТ, особенно – справа от него, где горизонтальные градиенты скорости максимальны и где возникают многочисленные ПАВ разных размеров.

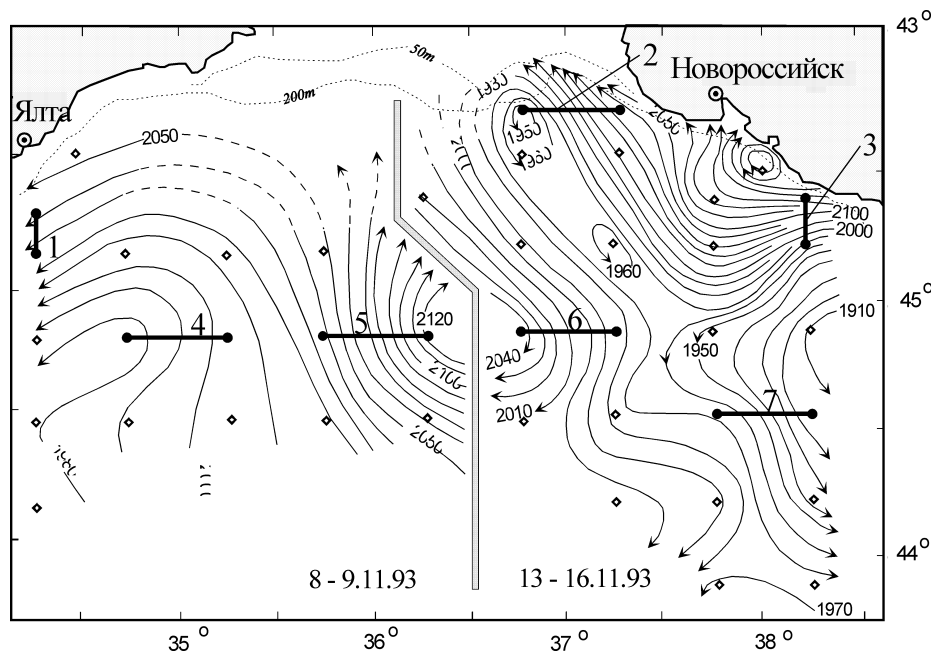
Экологическая роль небольших ПАВ, возникающих между потоком КЦТ и берегом, заключается в следующем. Эти ПАВ перемещаются в том же направлении, что и поток КЦТ (на запад, северо-запад). Во фронтальной части ПАВ орбитальное движение направлено к берегу, этот поток переносит на шельф более чистые воды, но в то же время он “прижимает” загрязненные воды шельфа к берегу и может привносить их в бухты и заливы, ухудшая на некоторое время экологическое состояние этих акваторий. В тыловой части ПАВ орбитальное движение направлено от берега в море. Следовательно, загрязненные воды шельфа выносятся из акватории шельфа в КЦТ, где загрязняющие примеси, благодаря большой горизонтальной и вертикальной турбулентности, интенсивно перемешиваются, разбавляются до малых концентраций и одновременно подвергаются утилизации.

Исключительно важная роль в экологии прибрежной части моря, включая шельф, принадлежит прибрежной зоне конвергенции (ПЗК), которая формируется в результате опускания вод в зоне действия КЦТ и ПАВ. Наибольшая интенсивность опускания вод происходит в стрессе КЦТ и хорошо развитых мезомасштабных ПАВ, расположенных в антициклонических меандрах КЦТ (Титов, 1992). Такие вихри к западу от Новороссийска и между Геленджиком и Туапсе представлены на рис. 4.2. Орбитальное движение в этих вихрях имеет составляющую скорости, направленную к его центру. Следовательно, загрязненные воды, попадающие со стороны шельфа в орбитальное движение вод ПАВ, постепенно (по нисходящей спирали) смещаются к центру вихря и погружаются в глубину. Таким образом, мезомасштабные ПАВ являются своеобразным аккумулятором при-

брежных вод. Опускающиеся в центрах ПАВ прибрежные воды вовлекаются в поперечную циркуляцию между прибрежной зоной конвергенции и центральными районами моря (центральная зона дивергенции). В ходе поперечной циркуляции загрязненные воды подвергаются самоочищению естественными гидрофизическими, гидрохимическими и гидробиологическими процессами.

Очень важная роль в экологии шельфа принадлежит также потоку КЦТ, когда его стрежень “прижат” к свалу глубин (верхняя часть материкового склона) или когда хорошо развитый циклонический меандр этого потока своей вершиной касается шельфа. В этих случаях скорости течений на шельфе достигают 70-80 см/с на поверхности моря и 50-60 см/с у дна, иногда они могут достигать 100-130 см/с на поверхности и 80-100 см/с у дна (Титов, 1989). Такой сильный поток вод в течение нескольких дней интенсивно “промывает” шельф и транспортирует не только загрязненные воды, но и огромное количество взвеси в открытое море.

В качестве схемы выноса вод из прибрежной зоны в открытое море можно привести динамическую карту, которая получена по данным гидрофизической съемки в 27-м рейсе нис “Витязь” в ноябре 1993 г. (Кривошея и др., 1997). Как следует из этой карты (рис. 4.11), 08-16 ноября 1993 г. поток КЦТ, следуя вдоль российского побережья, перед керченским мелководьем резко поворачивает налево, образуя вершину крупного циклонического меандра, вытянутого в юго-восточном направлении, внутри которого располагались небольшие циклонические вихри. Далее, на удалении около 120 км к юго-западу от Новороссийска, большая часть струи КЦТ резко поворачивает уже направо, образуя антициклонический меандр, внутри которого располагался хорошо развитый в глубину ан-



тициклонический вихрь. К юго-востоку от Новороссийска, в районе Геленджика, располагался ПАВ. Эти особенности динамики вод хорошо прослеживались и на горизонте 200 м, где присутствовали все отмеченные на поверхности моря динамические структуры.

Представление об интенсивности циркуляции вод в ноябре 1993 г. дает таблица составляющих геострофических течений через разрезы между двумя соседними станциями (табл. 4.5). Положение разрезов показано на рис. 4.11. Как и следовало ожидать, наибольшие скорости наблюдались в потоке КЦТ у российского побережья (см. рис. 4.11, разрезы 2 и 3). Особенно сильным было течение на разрезе 3, где западная составляющая в стрекне КЦТ достигала на поверхности моря 70 см/с, а на горизонте 100 м – 36 см/с. Течение хорошо прослеживалось до глубин 300-400 м. Из рисунка следует, что основной объем прибрежных вод из района Новороссийск-Геленджик выносился в глубоководный антициклонический вихрь, который в этом районе наблюдался еще в конце сентября – начале октября 1993 г. (Георгиев, Герасимов, Попов, 1994). Кроме того, имеются данные, что он присутствовал здесь и в другие годы: в июле 1984 г. и в ноябре 1987 г. (Латун, 1990) и во время международной экспедиции “HydroBlack-91” (Oguz et al., 1994). Следовательно, есть основания считать его квазистационарным. В этом случае динамическая ситуация, представленная на рис.4.11, может возникать довольно часто.

Таблица 4.5.

Составляющие геострофических течений (см/с) через разрезы, положение которых показано на рис. 4.11.

№ разрезов Горизонт, м	1	2	3	4	5	6	7
0	12,4	26,1	72,2	5,8	21,8	14,7	14,2
10	12,2	26,2	69,6	5,4	23,0	15,3	14,0
20	12,1	26,4	65,6	5,0	24,2	16,0	13,6
30	11,2	26,6	62,0	3,6	25,9	16,6	12,8
40	8,4	25,5	59,3	2,7	26,6	16,5	11,5
50	8,1	23,3	56,2	2,4	26,5	16,0	10,0
60	7,9	20,8	52,8	2,2	26,1	15,6	8,3
70	7,5	17,8	48,8	1,8	25,1	14,7	6,8
80	6,6	15,0	44,3	1,6	24,1	13,3	5,7
90	5,8	12,4	39,8	1,4	22,4	11,7	4,8
100	5,3	10,2	35,9	1,2	20,2	10,2	4,2
125	4,9	6,5	27,9	0,9	14,4	7,4	3,3
150	4,8	4,6	22,6	0,8	9,7	5,4	2,7
175	4,4	3,5	18,1	0,9	7,1	4,2	2,3
200	4,2	2,6	14,0	0,9	5,6	3,2	1,9
250	3,3	1,7	8,4	0,6	3,8	2,5	1,3
300	2,1	1,1	5,6	0,3	2,5	1,4	0,9
350	1,1	0,8	3,6	0,2	1,7	0,9	0,5

Результаты анализа продолжительных рядов измерений течений на российском шельфе Черного моря, а также динамические карты квазисинхронных гидрофизических съемок свидетельствуют об интенсивной вентиляции российского шельфа на участке от Анапы до Адлера, где его ширина не превышает 10 км. О динамике вод на широком шельфе (25-35 км) между Керченским проливом и Анапой экспериментальных данных для однозначных выводов пока недостаточно.

Главным источником энергии активной вентиляции шельфа является Кольцевое Циклоническое течение Черного моря и вихревые структуры в зоне его действия.

Наиболее вентилируемые акватории шельфа располагаются в районах, где суша выступает в сторону моря, – это районы мысов Утриш, Мысхако, Идокопас, Чуговкопас и Кадош. Несколько менее вентилируемыми являются акватории шельфа, где береговая линия имеет вогнутость в сторону суши. К таким акваториям следует отнести район Архипо-Осиповка – Джубга.

По нормали к берегу вентиляция шельфа неодинакова. Наиболее вентилируемой является внешняя часть шельфа (глубины 50-100 м). Здесь вероятность вдольбереговых течений северо-западного направления в 4-5 раз превышает вероятность течений противоположного юго-восточного направления. Максимальные скорости северо-западного направления могут достигать более 100 см/с от поверхности до дна. На участке шельфа с глубинами 20-50 м вероятность течений северо-западного направления превышает вероятность течений юго-восточного направления в 1,5-2 раза, максимальные скорости здесь достигают 40-50 см/с. На участке шельфа с глубинами от уреза воды до 15 м вдольбереговые течения двух противоположных направлений почти равновероятны. Максимальные скорости достигают здесь 20-30 см/с.

Менее вентилируемыми являются Цемесская и Геленджикская бухты. Специальных натурных исследований в Цемесской бухте не проводилось; имеется небольшое количество непродолжительных измерений в нескольких точках, из которых следует, что измеренные скорости течений находились в диапазоне 0-10 см/с, максимальные – 16-20 см/с. В Геленджикской бухте, наоборот, выполнено большое количество длительных измерений течений. Анализ этих данных показал, что в отличие от открытого побережья, где вентиляция шельфа зависит в первую очередь от КЦТ и вихревых структур в его зоне, вентиляция Геленджикской бухты (и Цемесской тоже) прежде всего определяется режимом ветра и только во вторую очередь – режимом течений на внешнем рейде. Анализ также показал, что бухты вентилируются неравномерно. Так, время полной вентиляции Геленджикской бухты (полная смена всего объема вод), в зависимости от ветровых условий и течений на рейде, составляет от 0,6-0,9 до 6 суток.
