

12. ТЕЧЕНИЯ

12.1. Течения Северного Каспия

Течения играют важную роль в гидрологическом режиме Северного Каспия. Характер течений в значительной степени определяет пространственно-временные изменения солености и мутности воды, адvectionию тепла, перенос и отложение наносов, формирование рельефа дна, перемещение планктона, особенности гидрохимического режима, процессы загрязнения вод и т. п.

Течения в Северном Каспии определяются ветром, стоком Волги и Урала, распределением плотности воды, они зависят от глубины и рельефа дна, подводной растительности и конфигурации береговой черты.

Речной сток и распределение плотности воды определяют постоянные течения, а воздействие ветра — ветровые и градиентные.

Сравнение скоростей постоянных и ветровых течений показывает доминирующую роль последних в изменении гидрологических условий Северного Каспия.

До 1950 г. в Северном Каспии было выполнено всего несколько тысяч наблюдений за течениями, приуроченных главным образом к ограниченным районам (каналы и т. п.). Серийных наблюдений практически не было. В 1954 г. Н. А. Скриптуко-вым была внедрена новая методика и основной упор сделан на синхронные учащенные наблюдения за ветром и течениями на судовых многодневных станциях и стационарных плавмаяках. Такие наблюдения, проводимые Гидрометслужбой, позволили проследить пространственно-временную изменчивость ветровых течений в разных районах Северного Каспия и получить длительные ряды натуральных данных. С 1962 г. в связи с широким внедрением постановок автономных самописцев течений БПВ-2 и расширением наблюдений на судовых многодневных станциях, плавмаяках и передвижном свайном основании (АПС) Астраханской ГМО по программе ГОИНа выполнено большое количество наблюдений за течениями, особенно в западной части Северного Каспия. Выполнялись также синхронные съемки течений одновременно 5—6 судами. Это был новый этап в получении натуральных данных о течениях рассматриваемого водоема. Часто длительные наблюдения проводились синхронно в 3—6 пунктах.

С 1961 г. регулярно проводятся наблюдения за течениями на «вековых» разрезах Северного Каспия. В течение 5 лет (1962—1966 гг.) течения определялись ежедекадно на разрезе о. Тюлений — Брянская Коса.

Наибольшее количество наблюдений за течениями выполнено в опорных пунктах — на плавмаяках Астраханском приемном (около 160 тыс.) и Волго-Каспийском (12 тыс.) и на стандартных многодневных станциях.

Меньше освещены наблюдениями восточная часть Северного Каспия. К 1988 г. в Северном Кас-

пии выполнено более 200 тыс. наблюдений за течениями, которые использованы в данной работе.

По режиму течений всю акваторию Северного Каспия можно разделить на три основных района: отмелые зоны устьевых взморьев рек Волги и Урала и остальную акваторию Северного Каспия. Для отмелых зон взморьев характерен своеобразный режим течений, обусловленный стоком рек, мелководностью и наличием водной растительности.

12.1.1. Течения в отмелой зоне взморья Волги

Отмеляя (глубины менее 1,3 м) зона взморья Волги представляет собой обширную (200×50 км) акваторию Северного Каспия, прилегающую к морскому краю дельты. В этой зоне доминируют стоковые течения. Только в апреле и ноябре, когда в некоторых местах взморья отсутствует водная растительность, проявляются слабые ветровые течения.

Отмелую зону взморья потоки волжских вод проходят двумя путями: по каналам (бороздинам) в виде руслового потока и по отмелому забровочному пространству в виде плоскостного стока. В первом случае речные воды, выходя из русла, продолжают двигаться по каналу (бороздине) вплоть до выхода за морской устьевой бар. Во втором случае речные воды, проходя через участок речного устьевого бара (микробара), постепенно растекаются широким фронтом по заросшему мелководью взморья, лавируя слабыми струями между островами, косами и куртинами водной растительности и изменяя направление и скорость своего движения. На морском устьевом баре даже слабая струйность плоскостного потока не проявляется.

За морским баром оба вида стоковых течений теряют свои особенности и мористее, до свала глубин, уже составляют однородное стоковое течение, которое охватывает почти весь слой воды от поверхности до дна (3—4 м). Скорости этого течения здесь в половодье составляют 6—8, в межень — 2—4 см/с.

Различно происходит и затухание скорости стокового течения по мере продвижения к морю: при стоке по каналу уменьшение скорости обычно происходит очень плавно и значительные скорости обычно сохраняются до выхода из устья канала; при плоскостном стоке скорости течения резко уменьшаются на микробаре, а затем становятся малыми и почти не изменяются до морского бара.

В условиях мелководного и сильно заросшего водной растительностью устьевого взморья водные потоки дробятся на мелкие струи и в основном переходят в плоскостной сток. В этих условиях искусственные каналы, сопряженные с русловой системой дельты, как правило, становятся магистралями движения речного стока.

В придельтовых участках каналов обычно происходит активное растекание вод по проранам в бровках каналов на забровочное пространство,

Таблица 12.1

Распределение скоростей течений и расходов воды вдоль Гандуринского канала (август 1983 г.)

Расстояние от морского края дельты, км	Средняя скорость, см/с	Расход воды, м ³ /с
0,0	50	105
0,4	41	50
7,0	24	28
21,0	40	70
38,0	28	22
44,0	74	—
55,0	15	—

Ниже по течению наблюдается свободное втекание вод в канал и растекание из канала на забровочное пространство, что создает очень неравномерное распределение скоростей стоковых течений и расходов воды по длине канала, что видно на примере Гандуринского канала (табл. 12.1).

В половодье различие между плоскостным и каналовым стоком уменьшается, а в межень — увеличивается.

С увеличением расхода воды, повышением уровня в отмелой зоне происходит увеличение доли плоскостного стока речных вод вследствие растекания воды по забровочному пространству, а доля каналового — уменьшается. Так, в районе Иголкинского канала плоскостной сток в отмелой зоне в половодье увеличивается в 5—7 раз по сравнению с меженью.

С наступлением межени, когда уменьшается сток, понижается уровень и наступает максимум развития водной растительности, плоскостной сток из взморья ослабевает, заметные стоковые течения сохраняются только в каналах и основных естественных бороздинах.

Скорость течения на забровочном пространстве в апреле равна 5, в пик половодья (июнь) — 15—20, в августе — 2 см/с. В канале в это время скорость течения изменяется от 20 до 60 см/с.

Особенно значительна роль каналов в пропуске волжских вод через отмелую зону взморья в ледовый период, когда лед резко сокращает площадь живого сечения взморья и уменьшает скорость стокового течения в забровочном пространстве.

Сезонные изменения скоростей течений в Волго-Каспийском канале составляют от 50 до 140 см/с (табл. 12.2).

На морском участке магистральных каналов, вблизи морского бара, скорости течения изменяются под воздействием сгонов и нагонов. Размах этих изменений составляет примерно 20—25 см/с [$\pm(10-12)$ см/с].

Таблица 12.2

Скорости течений на 145-м километре Волго-Каспийского канала в 1976 г.

Месяц	Средняя скорость, см/с	Месяц	Средняя скорость, см/с
Май	60—80	Август	90
Июнь	120—140	Сентябрь	50—80
Июль	70—100	Октябрь	70

На основе многолетних натурных наблюдений и фотосъемок из космоса составлена схема стоковых течений в отмелой зоне взморья (рис. 12.1).

Воды рек Бахтемира и Старой Волги в отмелой зоне идут по Волго-Каспийскому каналу и двумя широкими (до 2 км) струями с обеих сторон канала. Четкость этих струй прослеживается до 160-го километра канала. На остальной акватории района преобладает плоскостной сток без ярко выраженной структуры.

Воды Горной, Гандуринского и Никитинского банков (судоходных водотоков) проходят отмелую зону по Гандуринскому каналу широкой (до 2 км) вдольканаловой струей (в основном с западной стороны), которая дважды пересекает канал.

В Каменскую яму втекают воды Большого Белужьевого, Кулагина и Рытого банков, сливаясь дальше в единый широкий (до 4 км) поток по Кировскому каналу. На 15-м километре канала поток разделяется. Восточная ветвь вод идет по каналу до Бухтовых островов, а западная, обтекая отмель, поворачивает к юго-западу, а затем выходит на юг за морской бар через бороздину Проходную.

Отмель Барской косы прорезана речинами, по которым сбрасывается часть волжских вод из Каменской ямы в море. Скорость течения в речинах 20—80, в ледовый период — 20—50 см/с.

В Бардынинский район поступают воды Колочного, Створинского, Бардынинского банков. Часть этих вод по Карапатской бороздине идет на юго-восток в Тишковскую яму. Другая часть проходит отмелую зону по Бардынинскому каналу со скоростью 40—50 см/с, в между островами Бакачным и Хазавским скорость увеличивается до 80—100 см/с.

Волжские воды, поступающие в Тишковскую яму, разделяются на два потока: один идет по Тишковскому каналу на юг, другой — на юго-восток между островами Нижний Осередок и Большим Сетним.

Воды рек Бушмы и Таловой проходят по Белинскому каналу и к западу от него. На среднем участке отмечается активный отток вод канала через прорыны левой бровки. Южнее через правую бровку идет приток вод в канал.

В Карайский район выходят воды рукавов Чурки и Лебяжинки. Часть их идет по Карайскому каналу, а другая, большая, проходит по бороздине, расположенной к западу от канала.

Воды низовья р. Бузана проходят отмелую зону по Обжоровскому каналу. На забровочном пространстве здесь скорости течения слабые (3—4 см/с).

По Иголкинскому каналу в море поступают воды р. Широкой, а по Ганюшинскому — воды притока Шаронова.

Таким образом, в отмелой зоне взморья имеется шесть ярко выраженных стоковых потоков волжских вод: по Волго-Каспийскому, Гандуринскому, Кировскому, Бардынинскому, Белинскому и Карайскому каналам. В западной части отмелой зоны взморья течения в основном направлены на юг, а в восточной — на юго-юго-восток.

Падение уровня моря в 70-е годы изменило режим стоковых течений в отмелой зоне: увеличились скорости течения в морской части каналов, резко уменьшилось влияние сгонов на стоковые течения.

В годы последнего подъёма уровня Уменьшились скорости стоковых течений в морской части каналов, а увеличение расходов воды в Волге привело к повышению скорости течений в придельтовой части каналов. Зона максимальных скоростей стоковых течений в каналах взморья сместилась вверх по течению, ближе к морскому краю дельты.

В летне-осенний период существенное влияние на характеристики течений оказывает водная растительность, очень развитая в отмелой зоне взморья и вдоль каналов. Растительность препятствует формированию единого стокового и ветрового потока.

В половодье в отмелой зоне (с глубинами менее 1,5—2,0 м), а при слабых ветрах и в межень доми-

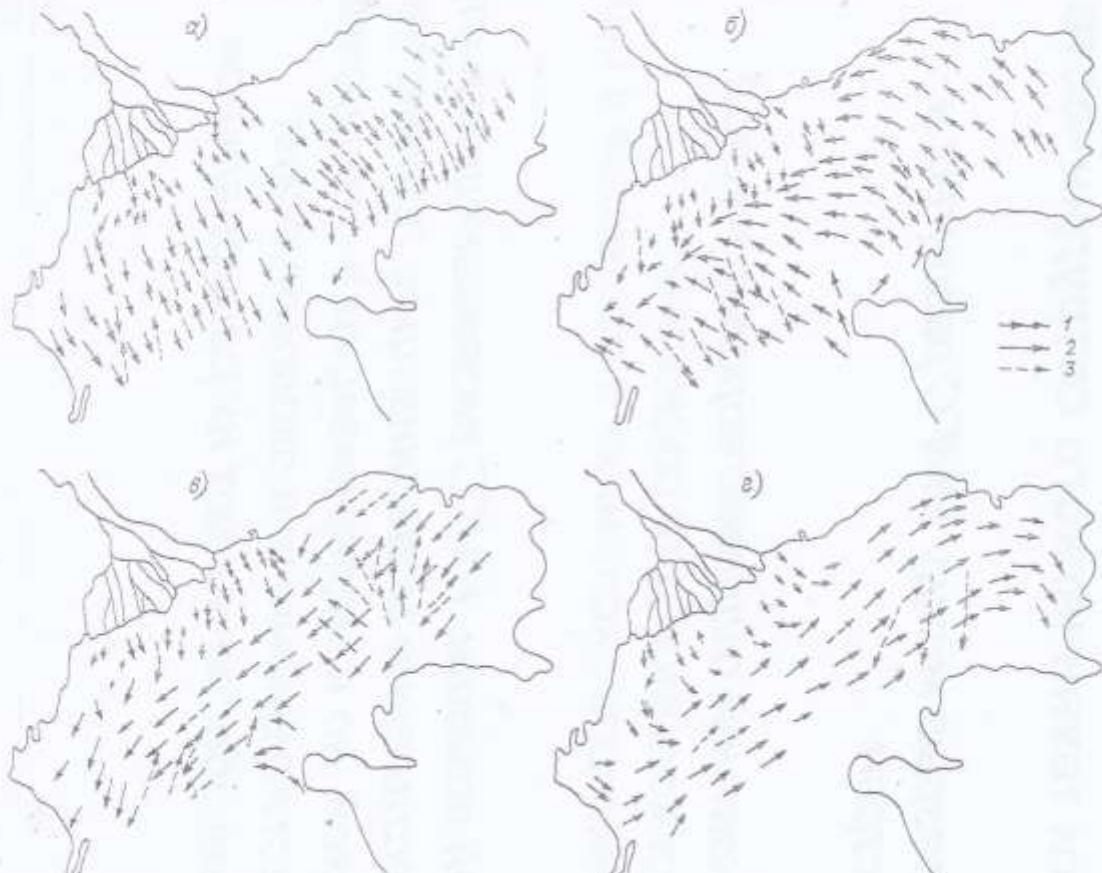


Рис. 12.1. Стоковые (1) и ветровые течения на поверхности (2) и у дна (3) при устойчивых северо-западном (а), юго-восточном (б), северо-восточном (с) и юго-западном (д) ветрах.

12.1.2. Течения на устьевом взморье Урала

На устьевом взморье Урала течения изучены слабо. С 1957 по 1984 г. на взморье выполнено около 9 тыс. одноразовых наблюдений за течениями, причем большинство из них — при спокойной погоде. Течения на уральском взморье определяются стоком реки и ветром. Уральские воды выходят на устьевое взморье в основном двумя сопредоточенными потоками через Урало-Каспийский и Янцкий каналы, которые суммарно пропускают 80 % стока реки. Остальная часть стока поступает на взморье через малые протоки дельты и прораны в бровках Урало-Каспийского канала.

Весной над взморьем Урала преобладают восточные и юго-восточные ветры (35—40 %), летом (июнь—август) увеличивается повторяемость ветров северо-западной четверти, а осенью опять преобладают ветры восточных румбов. Скорость ветра постепенно убывает от весны к лету, а к осени — увеличивается.

нируют стоковые течения: в каналах в виде русло-вого потока, на забровочной акватории в виде широкого плоскостного стока. В половодье различие между струйным и плоскостным стоком уменьшается, а в межень — увеличивается.

В Урало-Каспийском канале (УКК) скорость стокового течения в половодье может достигать 100—150, в межень — 20—35 см/с. Среднее направление течения в канале — 225° (на юго-запад). Мористее основная масса уральских вод поворачивает на юг и даже на юго-восток [374].

На забровочном пространстве скорость стокового течения равна 10—15, в межень — 4—7 см/с. Максимальная скорость отмечается в пик половодья (конец мая — начало июня), при котором на взморье поступает до 70 % годового стока Урала.

При ветре характеристики течений изменяются, и на устьевом взморье преобладает течение, обусловленное совместным действием стока реки и ветра. В результате этого даже в УКК отмечается большая пространственно-временная изменчивость

течений вплоть до появления течений, обратных стоковому.

В ледовый период в средней части канала скорости течения равны 30—35, в устье канала — 8—14, а на взморье, в 7 км от устья УКК, — 3—4 см/с. По данным БПВ-2 за ряд лет (горизонт 1,5 м) в 6 км к западу от о. Зюйдвестовая Шалыга основное движение воды подо льдом идет на юго-восток (36 %), восток (31 %), а также на север (15 %). Скорости течения в 96 % случаев были менее 5 см/с.

В безледный период в пригубной (с глубинами более 2 м) части устьевого взморья Урала господствуют ветровые течения, направление которых в основном совпадает с направлением устойчивого ветра. Наибольшая устойчивость направлений течений отмечается при восточном и западном ветрах, а наименьшая — при южном ветре. По вертикали направление течения обычно не изменяется.

В безледный период года на взморье Урала доминирует (до 20 %) перенос вод из юго-восток, вдоль гряды островов и шалыг.

При нагонных (от западного до юго-восточного через юг) и нейтральных (западо-северо-западном и востоко-юго-восточном) ветрах на устьевом взморье существует полоса сопряжения стокового и встречного ветрового течений, обычно располагающаяся в районе полутораметровой изобаты.

Бесной и осенью преобладает перенос вод в западном направлении, а летом — в восточном. Наибольшие скорости характерны для юго-восточного и северо-западного направлений течений. Ветровой коэффициент при скоростях ветра в интервале 5—10 м/с для взморья Урала составляет 0,02—0,029.

Ветровые течения на мелководном взморье быстро (за 1—3 ч) развиваются и затухают. Скорости течения в отмелой зоне взморья меньше, чем на предустьевом пространстве моря.

Средняя скорость ветра в период наблюдений за течениями на взморье Урала равна 4,3 м/с, а средняя скорость течения — 9,4 см/с. Средняя же скорость ветра по наблюдениям на ГМС Зюйдвестовая Шалыга за весь безледный период 1956—1964 гг. равна 5,8 м/с. Отсюда по установленному для взморья Урала среднему ветровому коэффициенту ($K = 0,022$) расчетная средняя скорость течения здесь равна 13 см/с.

12.1.3. Ветровые течения

В Северном Каспии выделяются стоковые, плотностные, ветровые и компенсационные течения. Постоянные течения — стоковые и плотностные — характерны для устьевого взморья Волги (до района с глубинами 12—15 м) и заметны лишь при устойчивом штиле.

Поскольку повторяемость штиля в Северном Каспии мала (6—8 %), то основное значение имеют ветровые течения. Мелководность водоема обуславливает резкие изменения направления и скорости ветрового течения, которое быстро развивается и затухает, усиливает роль ветров в формировании течений.

Схемы течений Северного Каспия по данным наблюдений предлагались Н. М. Кипловичем [213], А. И. Михалевским [276], Н. Н. Горским [128], В. А. Ледневым [243], А. К. Леоновым [245] и др.

На основании синхронных многосуточных наблюдений в Северном Каспии, проведенных в 1954—1956 г., Н. А. Скрипунов составил схему стоковых и ветровых течений на взморье Волги [395], в 1974 г. — схемы ветровых течений в западной части Северного Каспия [370], а затем и для всего Северного Каспия [371]. Сходные схемы течений получены на основе материалов Астраханской ГМО и ГОИНа [444].

Ветры со скоростью 5 м/с не вызывают значительных и устойчивых течений. При неустойчивых и слабых ветрах направление течений может быть практически любым. Поэтому составлять схемы течений для таких периодов нецелесообразно.

При сильных и устойчивых ветрах течение обычно имеет строго определенное направление, соответствующее данному ветру, и в этом случае для фазы развития скорости ветра может быть дана типичная схема течений.

Относительно четкая зависимость скорости течения от ветра получена для устойчивых по скорости и направлению ветров (табл. 12.3).

При переменном или ослабевающем ветре эти зависимости не выполняются, поскольку в этом случае основную роль начинают играть компенсационные (градиентные) течения.

При смене направления ветра схема течений постепенно, а иногда резко изменяется в соответствии с ветром другого направления. Летом, когда слабые неустойчивые ветры часто сменяются штилями, смежные периоды устойчивых течений разделяются продолжительными (до нескольких суток) периодами слабых, неустойчивых течений.

При северных и северо-западных устойчивых ветрах направление ветрового течения в целом совпадает с направлением стокового течения. При всех остальных ветрах на взморье Волги существует зона схождения стокового и ветрового течений, положение которой в зависимости от направления, скорости и продолжительности действия ветра и расхода воды в реке меняется. Обычно эта зона приурочена к морскому устьевому бару взморья, само существование которого отчасти может быть объяснено наличием здесь зоны схождения речного и морского потоков и отложения илосов, поступающих из дельты реки и со стороны моря.

Активное взаимодействие стокового и ветрового течений отмечается в относительно узкой зоне на мористом склоне устьевого бара с глубинами 0,6—1,8 м. На устьевых участках больших каналов эта зона обычно на 1—2 км смещена к югу.

На Кулалинском пороге при северном ветре в районах с глубинами более 3 м течение у dna

Таблица 12.3

Зависимость скорости течения (см/с) от скорости и направления устойчивого ветра в центральном районе Северного Каспия [372]

Скорость ветра, м/с	Направление ветра							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	Э	СЭ
5	13	18	16	12	13	18	15	13
7	19	25	22	15	16	24	19	18
10	28	33	30	22	22	31	28	23

часто направлено на северо-запад и северо-восток. При ветрах с восточной составляющей, т. е. когда на взморье Волги происходит нагон, на пороге придонное течение обычно отклоняется в сторону открытого моря к югу от поверхностного на 20—30°. На поверхности течение, как правило, соответствует ветру. При северо-восточном ветре течение идет на юго-запад на всех горизонтах, а при юго-западном — на северо-восток. Ветры от северо-северо-запада до юго-востока (через восток) вызывают на пороге течения, направленные в западную часть Северного Каспия, а ветры остальных румбов — в восточную.

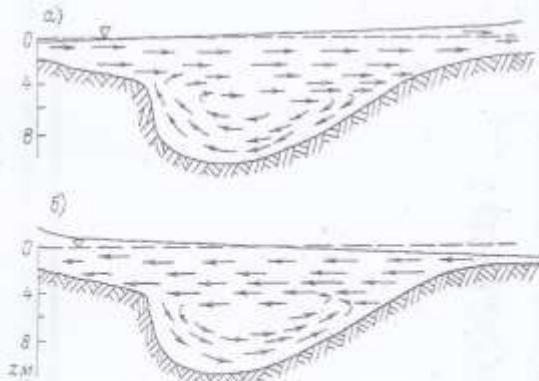


Рис. 12.2. Циркуляция вод в Уральской бороздине (разрез с северо-запада на юго-восток) при устойчивых северо-западном (а) и юго-восточном (б) ветрах.

В районе о. Кулалы при северо-восточном ветре происходит схождение двух потоков — от северо-востока и от востоко-юго-востока.

При сильном северо-северо-западном ветре течение на поверхности идет по ветру, а в придонном слое в районе с глубинами более 3 м — против ветра.

При сильном северо-западном ветре на северном мелководном участке (с глубинами до 3,5 м) течение направлено по ветру от поверхности до дна, а на южном участке — на юго-запад.

При слабом ветре (до 4—5 м/с) после сильных сгонных или нагонных течений на пороге отмечается градиентное течение, часто противоположное направлению ветра.

В Уральской бороздине при устойчивом сильном (10 м/с) северо-восточном ветре течение направлено строго по ветру (вдоль длинной оси бороздины). При устойчивых сильных восточном и юго-восточном ветрах в поверхностном 5-метровом слое и в районах с глубинами менее 4—5 м течение идет по ветру, а на горизонтах более 5 м создается течение, противоположное поверхностному (чаще всего на юго-восток).

При устойчивых сильных северном и северо-западном ветрах в поверхностном слое течение направлено по ветру, а на глубинах более 5 м отмечается (рис. 12.2) противотечение (на северо-запад, западо-северо-запад).

При юго-западном ветре в поверхностном слое течение идет по ветру, а в придонном слое — противотечение с западной составляющей.

В восточной части Северного Каспия при определенных ветровых полях иногда могут возникать кратковременные (несколько часов) горизонтальные циркуляции вод. Так, при устойчивых юго-восточном и северо-восточном ветрах возможно формирование циклонической циркуляции. При западо-юго-западном и юго-юго-западном ветрах может создаваться антициклоническая циркуляция вод.

Анализ многолетних наблюдений за течениями на многосуюточных станциях особенно в штиль, позволяет утверждать, что какой-либо постоянно действующей или часто повторяющейся горизонтальной циркуляции вод в восточной части так же, как и во всем Северном Каспии, не наблюдается.

На мелководье вдоль восточного побережья Северного Каспия доминирует вдольбереговое течение (север—юг).

Различие в направлении течений в поверхностном и придонном слоях в Северном Каспии определяется глубиной и рельефом дна, вертикальным распределением плотности воды, продолжительностью и скоростью ветра.

В поверхностном 3—4-метровом слое в районах с глубинами менее 3 м, как правило, течения, вызванные ветром, имеют по вертикали одно направление, за исключением районов отмелей, где в придонном слое направление течений отклоняется от поверхностного под влиянием рельефа дна.

Двухслойное течение часто наблюдается в районах с глубинами 5 м и более, особенно в районе свала глубин на взморье Волги. Если поверхностное течение направлено вдоль морского бара и свала глубин (на северо-восток и юго-запад), то течение в придонном слое совпадает с ним по направлению. Поверхностное течение нагонного типа (нормально свалу глубин) вызывает в придонном слое течение, направленное почти вдоль свала глубин.

Если же поверхностное течение имеет сгонное направление, т. е. идет под большим углом к линии свала глубин от дельты Волги, то придонное течение направлено почти противоположно поверхностному, возникает сгонная циркуляция вод. Именно при сгонных ветрах наиболее часто наблюдаются двухслойные течения.

На взморье Волги, мористее морского бара, в поверхностном слое преобладают ветровые течения основных направлений ветра (восточные румбы), а в придонном — градиентные компенсационные течения, противоположные основному направлению сгонно-нагонных ветров.

Критическая глубина, при которой возникают придонные компенсационные течения, в среднем равна 2,5—3 м и прямо пропорциональна скорости ветра, уклону дна и обратно пропорциональна вертикальному градиенту плотности воды [372].

В зоне смешения существенное влияние на течение оказывают вертикальные градиенты плотности воды.

По материалам наблюдений на плавмаяках и многосуюточных станциях в Северном Каспии в среднем в 70 % случаев проявляются ветровые течения, в 12 % преобладают градиентные течения, вызванные сгонно-нагонными колебаниями уровня моря, и около 18 % составляют слабые, неустойчивые течения.

В районе свала глубин в поверхностном слое при ветрах, параллельных свалу, до 60 % направлений течений строго совпадают с направлением ветра. При ветрах, перпендикулярных свалу глубин, строго по ветру направлено только 35—40 % суммарных течений.

На Кулалинском пороге при восточном ветре строго по ветру направлено 74 % течений, при северо-восточном — 60 %, при юго-западном — 63 %, при остальных направлениях — до 40 %.

В западной части взморья (плавмаяк Астраханский приемный) строго по ветру направлено до 50 % течений при северо-восточном и юго-западном ветрах, а при ветрах остальных румбов совпадение направления течения и ветра составляет 20—25 %. В районе плавмаяка Волго-Каспийского около 50 % всех направлений течений совпадает с направлением ветра, а отклонение вправо и влево от направления ветра на угол до 45° составляет 85—90 %.

Повторяемость типовых схем течений определена по повторяемости направлений, скоростей и продолжительности непрерывного действия ветра одного направления за безледный период по материалам гидрометстанций Северного Каспия за 20 лет. Выбирались случаи продолжительного (не менее 6 ч), развивающегося или устойчивого по скорости умеренного или сильного (не менее 5 м/с) ветра. На этой основе составлена таблица повторяемости схем течения для каждого из 8 основных направлений ветра (табл. 12.4).

Суммарная повторяемость действия устойчивых ветровых течений по типовым схемам за безледный период для всех 8 румбов равна 44 %. В остальное время отмечаются слабые, разнонаправленные и неустойчивые течения.

При штиле (5 % всех случаев наблюдений) в зависимости от глубины и удаленности района от берега в 8—25 % случаев течение отсутствует или настолько слабое, что не имеет четкого направления. Чем ближе к побережью и мелководнее район, тем больше повторяемость отсутствия течений при штиле. В мористых районах, где глубина больше, движение вод по инерции после устойчивых ветров сохраняется более долго, поэтому здесь при штиле меньше повторяемость отсутствия течений. В остальных случаях при штиле действуют градиентные или инерционные течения, причем они в основном доминируют в двух направлениях, вдоль длины оси Северного Каспия: на северо-восток и восток (до 25 %) и на юго-запад и запад (до 30 %).

Для всех пунктов долговременных наблюдений в Северном Каспии определены направления наибольших из средних скоростей течений, вычисленные для каждого румба. В поверхностном слое наибольшие из средних по румбам скорости имеют течения двух направлений — северо-восточного и юго-западного. В западном и восточном прибрежных районах наибольшие средние скорости течения характерны также для двух румбов — южного и

северного. Наименьшие скорости течений практически для всех районов отмечаются при юго-восточном ветре.

Наибольшие из средних по румбам скоростей течений у дна имеют два направления — на юго-запад и северо-восток. Абсолютные наибольшие (90—100 см/с) скорости течений в поверхностном слое также характерны для двух румбов — юго-западного (наиболее вероятного) и северо-восточного. То же самое типично и для придонного слоя во всех районах, за исключением западного, где течения направлены на юг. В зоне стоковых течений и в каналах устьевого взморья Волги абсолютные наибольшие скорости характерны для южного и юго-восточного направлений течений.

Таким образом, направление наибольших средних и абсолютных наибольших скоростей течений за многолетний период совпадают с румбами наибольшей повторяемости течений (северо-восток и юго-запад). Эти течения направлены вдоль морского устьевого бара взморья Волги и северного побережья, а в западном и восточном прибрежных районах преобладают течения вдоль береговой черты (север — юг).

Основной перенос масс воды происходит вдоль большой оси Северного Каспия. У западного побережья с глубинами менее 5 м преобладающее течение направлено вдоль берега на юг и совпадает по направлению со стоковым.

Основными причинами преобладания указанных течений являются повторяемость действия ветра определенных румбов, а также конфигурация береговой черты и рельефа дна Северного Каспия.

Течения, вызываемые ветрами от северного (через восток) до восточно-юго-восточного направления, имеют составляющую на запад, а вызываемые ветрами от южного (через запад) до западо-северо-западного направления — составляющую на восток.

Кроме того, поскольку наиболее устойчивы и продолжительны течения, направленные на юго-запад и северо-восток, эти румбы характерны и для наиболее продолжительных результирующих течений, повторяемость которых включается в повторяемость преобладающих течений.

Особенности рельефа дна западной части Северного Каспия существенно влияют на направление преобладающих течений в некоторых районах. К таким особенностям относятся ориентация изобаты 5 м, наличие крупных банок (Безымянной, Кулалинской), вытянутых на юго-запад, морского устьевого бара Волги и т. д. У западного побережья банки Большая Жемчужная, Средняя Жемчужная, банка о. Тюленево и ряд других отмелей ориентированы в меридиональном направлении.

При слабых (до 5 м/с) неустойчивых ветрах перенос вод незначителен и им можно пренебречь. При устойчивых ветрах большей силы на фазе их развития или стабилизации ветровое течение в основном соответствует направлению ветра или от-

Таблица 12.4

Повторяемость типовых схем течений в Северном Каспии в безледный период

Схема течений, соответствующая направлению ветра	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Повторяемость, %	2	6	11	8	1	3	5	8

клоняется от него под влиянием конфигурации берега вправо или влево не более чем на 45°.

При переносе вод течениями выделяются три вида периодов: продолжительного (1—2 сут) переноса вод в одном направлении при устойчивом ветре; кратковременные (обычно несколько часов) периоды смены направления одного устойчивого переноса вод другим; периоды штилей и слабых ветров, при которых перенос вод в одном направлении практически не происходит.

Расстояние переноса вод за период их движения в одном направлении $W_{\text{ср}} \Delta t$ изменяется от 5 до 100 км, причем 63 % повторяемости приходится на интервал 5—20 км.

12.1.4. Сезонные изменения течений

Под влиянием крупномасштабных изменений атмосферной циркуляции и тепловых процессов в Северном Каспии выделяются два основных периода в режиме течений — безледный и ледовый.

В ледовый период вода изолирована от действия ветра. В результате этого в Северном Каспии практически прекращаются ветровые течения и увеличивается относительная роль стока Волги и Урала в возбуждении течений подо льдом. Однако сток речных вод, особенно Урала, в зимний период мал, поэтому стоковые течения заметны только на южном взморье, в зоне транзита речных вод. В западной части Северного Каспия подо льдом эпизодически проявляются также инерционные и градиентные течения как следствие развития ветровых течений южнее кромки льда.

Весной и осенью преобладают ветры восточных (26 %) и юго-восточных (19 %) направлений. Летом (июнь—июль) увеличивается повторяемость западных, юго-западных и южных ветров, хотя в целом в эти месяцы несколько преобладают восточные ветры.

Повторяемость умеренных и сильных ветров в летний период заметно уменьшается по сравнению с весной и осенью. Такие же изменения отмечаются и в продолжительности непрерывного действия ветра одного направления.

Летом погодные условия в Северном Каспии неустойчивы, отмечается довольно частая смена направлений и скорости ветра. Действующие в это время обычно слабые переменные ветры не вызывают сколько-нибудь устойчивых по направлению течений, и, следовательно, в целом результатирующий перенос вод в этот сезон незначителен.

Весной и осенью, когда над Северным Каспием обычно устанавливается отрог азиатского антициклона, ветры наиболее устойчивы по направлению, продолжительны и имеют более высокие скорости.

В эти сезоны течения более устойчивы по направлению и перенос вод значителен.

Разложение суммарного вектора на составляющие по материалам наблюдений на плавмаяке за 1961—1979 гг. показало, что в широтном переносе вод весной в поверхностном слое несколько преобладают течения с западной составляющей (53 %), летом — с восточной (59 %), а осенью — вновь с западной (58 %). На горизонтах 5 м и ниже во все сезоны преобладают течения с восточной составляющей (55—65 %).

В меридиональном переносе вод весной в западной части Северного Каспия преобладают течения, направленные на юг (22 % против 14 % на север), осенью — тоже на юг (23 % против 16 % на север), летом — на север (22 % против 14 % на юг), причем эта закономерность наиболее четко проявляется на горизонтах 5 м и ниже.

Таким образом, в поверхностном слое весной и особенно осенью преобладает перенос вод в западном и юго-западном направлениях, летом усиливается перенос на северо-восток и восток. В целом за безледый период преобладает перенос вод вдоль морского бара взморья Волги на запад и юго-запад. В придонном слое при глубинах более 5—6 м почти во все сезоны немногого чаще преобладает перенос вод на восток (северо-восток).

Большое значение в сезонном изменении характеристик течений по вертикали имеет распределение плотности воды. В весенне-летний период, особенно при устойчивых сгонных ветрах, в западной части Северного Каспия в районах с глубинами более 6—7 м распределение плотности воды по вертикали неоднородно, в придонных горизонтах обычно имеется слой скачка плотности, который разделяет толщу воды на два слоя с различными характеристиками течений.

Ранней весной и поздней осенью, а также в летний период при сильных (более 10 м/с) продолжительных нагонных ветрах плотность воды однородна до горизонтов 15—20 м и различия в характеристиках течений на разных горизонтах малы.

Соотношение скоростей в поверхностном и придонном слоях изменяется по сезонам в зависимости от вертикальных градиентов плотности и средней скорости ветра. Для районов с глубинами более 6—8 м чем больше среднемесячная скорость ветра и чем меньше разность плотности поверхностного и придонного слоев, тем меньше различие в значениях скоростей (табл. 12.5) и в направлениях течений в этих слоях [370].

Обычно наибольшее различие между скоростями поверхностного и придонного течений отмечается при сгонах, а наименьшее — при натонах. В отдельных случаях различие в скоростях течений в слоях

Таблица 12.5

Среднемесячная скорость ветра, разность условной плотности воды и средних скоростей течений между поверхностным и придонным слоями в районе свала глубин взморья Волги
(Астраханский приемный плавмаяк, 1962—1979 гг.)

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Средняя скорость ветра, м/с	6,9	6,6	5,9	5,5	4,8	6,1	6,0	7,0
Разность условной плотности воды	1,50	1,88	2,71	3,07	1,85	0,89	-0,46	0,35
Разность средних скоростей течений, см/с	7	6	7	7	4	2	2	2

Таблица 12.6

Среднемесечные скорости течений (см/с) в районе свала, глубин взморья Волги (Астраханский приемный плавмаяк)

Горизонт, м	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Средн.
0	19,0	17,9	16,8	14,7	13,2	15,0	14,3	14,8	15,7
5	16,6	16,5	16,0	14,2	14,3	15,5	14,2	14,1	15,2
9	11,4	11,9	10,1	8,0	9,8	13,1	12,8	12,0	11,1

выше и ниже слоя скачка плотности воды из взморье Волги может достигать 25 см/с.

На всех горизонтах наблюдаются сезонные изменения средней за месяц скорости течения. Наибольшая скорость отмечается весной (табл. 12.6),

Таблица 12.7

Повторяемость (%) направлений течений, осредненных по трем горизонтали (0, 5, 9 м) за беззимний период (Астраханский приемный плавмаяк, 1961—1979 гг.)

Месяц	Направление течения									
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	С	
Май	11,0	11,4	6,3	11,7	21,0	21,0	8,4	7,4	1,8	
Июнь	17,1	16,1	7,1	8,2	15,0	15,1	8,1	10,2	2,4	
Июль	16,7	17,6	7,9	9,0	14,6	15,0	8,1	9,5	2,5	
Август	13,5	14,2	7,1	9,5	17,8	17,8	10,8	7,7	1,8	
Сентябрь	14,2	12,8	5,3	10,4	18,6	16,7	10,6	9,4	1,0	
Октябрь	15,0	11,3	5,3	10,9	19,5	17,9	9,1	8,5	1,4	
Ноябрь	13,5	9,6	5,7	10,2	21,1	20,9	9,9	4,7	0,7	
Среднее	14,3	13,3	6,7	10,1	18,4	18,0	9,3	8,2	1,7	

летом (июль—август) она становится минимальной, а к осени вновь увеличивается, что находится в полном соответствии с режимом скорости ветра.

В переходный период между летним и осенним сезонами (сентябрь) на всех горизонтах отмечается несколько повышенная средняя скорость течения (см. табл. 12.6), что объясняется повышенной активностью ветра в этом месяце.

Сезонные изменения характеристик течений проявляются внутри отдельных румбов направлений течений (табл. 12.7, 12.8).

Таблица 12.8

Среднемесечная и за беззимний период скорости течений (см/с) на горизонте 5 м по румбам (Астраханский приемный плавмаяк, 1961—1979 гг.)

Месяц	Направление течения								
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
Май	15,5	17,1	15,6	15,5	17,9	15,9	13,3	12,4	
Июнь	20,2	19,9	14,2	15,4	16,7	15,2	14,2	15,1	
Июль	14,2	16,7	11,1	9,9	13,9	12,0	11,9	11,8	
Август	14,7	15,6	14,4	13,2	14,9	15,8	13,1	10,5	
Сентябрь	16,1	14,3	11,8	14,9	15,2	14,0	13,8	11,0	
Октябрь	19,4	14,4	12,7	15,2	17,5	15,0	13,2	14,0	
Ноябрь	20,5	16,5	13,0	10,9	15,6	14,7	11,7	12,9	
Беззимний период	17,5	16,5	13,2	13,7	16,1	14,8	13,0	12,5	

12.1.5. Межгодовые изменения течений

Межгодовые изменения течений и итогового за беззимний период переноса вод в западной части Северного Каспия определяются межгодовыми изменениями ветра, стока Волги и тепловых процессов, влияющих на вертикальное распределение плотности воды [373].

В годы с увеличением повторяемости ветров восточных румбов увеличивается перенос вод вдоль большой оси Северного Каспия на юго-запад, вынос их в западную часть Среднего Каспия и усиление притока воды из Среднего Каспия в Северный в районе п-ова Тюб-Караган и о. Кулалы.

В годы с усилением переноса воздушных масс с запада отмечается обратный процесс — усиливается движение вод в восточном и юго-восточном направлениях, а в придонном слое — поступление вод из Среднего Каспия в Северный, т. е. чаще наблюдается циркуляция сгонного типа.

Влияние стока Волги проявляется в том, что в многоводные годы в период половодья в поверхностном слое усиливается перенос вод от дельты Волги на юг, а в придонном слое — подток морских холодных вод на север. В маловодные и холодные годы эти процессы выражены слабее.

Многолетняя изменчивость течений и переноса вод проявляется главным образом в изменениях повторяемости направлений течений и в меньшей степени — их скорости. Среднеквадратическое отклонение для повторяемости направлений течений почти в 1,5—2 раза больше, чем для средней по румбам скорости. Это вытекает из самой природы межгодовой изменчивости основного фактора, вызывающего течения в этом районе — ветра.

Изменчивость осредненных за беззимний период характеристик течений от года к году происходит в основном за счет их изменений в мае—июне и в октябре—ноябре, т. е. в те месяцы, когда более активно развивается ветровой перенос вод в Северном Каспии, и в меньшей степени — в летний период.

Значительную долю в межгодовой изменчивости течений составляют изменения направления в двух секторах: от северного до северо-восточного и от южного до юго-западного, т. е. течений, имеющих наибольшую повторяемость.

Наименьшая межгодовая изменчивость осредненных за беззимний период характеристики течений отмечается для направления наименьшей повторяемости течений (восток).

Межгодовая изменчивость течений, а следовательно, и итогового за год переноса вод наиболее выражена в поверхностном слое (табл. 12.9).

В 70-е годы в межгодовых колебаниях повторяемости течений в западной части Северного Каспия произошло изменение: значительное усиление переноса вод на юг и юго-запад и его ослабление на север и северо-восток. Это связано с некоторым увеличением повторяемости ветров восточных румбов и, отчасти с усилением стокового потока из Волго-Каспийского канала и западных рукавов дельты Волги.

Анализ многочисленных синхронных наблюдений за течениями на плавмаяке, многосуточных и буйковых станциях показал относительную однородность поля течений и общность их синоптичес-

Таблица 12.9

Характеристики результатирующих векторов течения за беззадний период (апрель—ноябрь) по наблюдениям на Астраханском приемном плавмаяке (1961—1979 гг.)

Год	Горизонт, м					
	0		5		9	
	Направление,	Скорость, см/с	Направление,	Скорость, см/с	Направление,	Скорость, см/с
1961	199	1,5	201	2,8	170	2,2
1962	24	2,6	86	3,4	88	1,2
1963	109	0,9	3	1,4	320	1,0
1964	298	0,2	97	1,3	124	1,3
1965	5	0,2	77	2,8	177	0,6
1966	264	1,9	102	3,2	179	2,0
1967	224	1,5	206	0,9	155	1,9
1968	247	3,8	192	3,3	185	3,8
1969	24	0,6	137	0,7	262	0,5
1970	309	2,0	61	2,9	128	0,2
1971	231	3,1	153	0,9	149	2,1
1972	266	1,8	75	2,1	136	2,5
1973	109	0,6	29	1,7	244	0,7
1974	240	4,8	200	4,0	205	3,7
1975	219	5,1	202	3,0	195	3,4
1976	216	6,7	202	4,6	207	4,5
1977	206	4,7	270	1,0	239	2,5
1978	176	3,2	242	2,7	223	2,9
1979	262	5,9	229	1,7	218	2,3
Среднее	232	2,2	146	1,0	192	1,6

ких изменений практически во всей западной части Северного Каспия. Поэтому основные черты межгодовой изменчивости течений и переноса вод, полученные для района плавмаяка, характерны для всей западной части Северного Каспия.

12.16. Статистические характеристики течений

Статистические характеристики течений даны на основе стационарных долговременных наблюдений (10—20 лет), в первую очередь, на плавмаяках Астраханском приемном и Волго-Каспийском и на многолетних многосточных станциях V и VII (более 150 тыс. наблюдений).

Оценка имеющегося ряда наблюдений за течениями по основному определяющему течения фак-

тору — ветру [365] показала, что выборка синхронно наблюдаемых ветра и течений достаточно полно отражает многолетнюю климатическую характеристику ветра в этих районах. Использованный статистический ряд является однородным и его члены практически независимы. Корреляционный анализ показал, что характеристики течений двух смежных наблюдений через 6 ч слабо связаны между собой (коэффициент корреляции 0,5). Оптимальная градации для статистической обработки наблюдений за течениями определено значение 4—5 см/с.

Исследование зависимости изменений статистических характеристик течений от длины ряда показало, что для получения устойчивых вероятностных характеристик в условиях Северного Каспия достаточно 2500 наблюдений в одном пункте, выполненных через 6 ч. В этом случае получаем повторяемость направлений течений по каждому из 8 румбов с точностью до 0,5 %, средние скорости с точностью до 0,5 см/с, надежную кривую распределения вероятности модуля скорости течения. Среднеквадратическая погрешность определения средней скорости равна 0,2 см/с.

Кривая распределения вероятности модуля скорости течения в Северном Каспии аппроксимируется кривой распределения Рэлея [367].

По мере приближения ко дну и берегу кривая распределения становится более асимметричной, сдвигается в сторону малых значений скорости, а вероятность модального значения увеличивается (рис. 12.3).

Средняя скорость течения для разных пунктов Северного Каспия равна 14,5—18,0 см/с, ее обеспеченность составляет 45—47 %. Модальное значение скорости, равное 11—12 см/с, имеет обеспеченность 55—60 %.

Максимальная скорость течения по наблюдениям превышает значение средней скорости в 4,7 раза, скорость обеспеченности 1 % — в 3,3 раза, а скорость обеспеченности 5 % — в 2,5 раза.

Имея среднюю скорость и зная закон распределения скоростей, можно определить предельные значения. Для этого, задавшись некоторой доверительной вероятностью, определяют переходный коэффициент.

Максимальные скорости, приближенно рассчитанные по зависимости скорости течения от скорости ветра путем экстраполяции, имеют порядок 1,2—1,3 м/с при скоростях ветра 24—28 м/с.

Течения в Северном Каспии отличаются большой временной изменчивостью. Анализ изменений скорости течений между двумя смежными срочными наблюдениями (через 6 ч) показал, что в 70 % случаев скорость изменялась на 6 см/с и менее, а в 50 % случаев — не более чем на 4 см/с. Изменение скорости течения за 6 ч более чем на 10 см/с происходит в 12 % случаев.

Изменения направлений течений за 6 ч до 20° составляют 4 %, на 40° ($\pm 20^\circ$) — 58 % случаев.

Размах колебаний средней скорости течения за период навигации от года к году равен 5 см/с.

Межгодовая изменчивость средней скорости течения внутри каждого румба для преобладающих направлений (юго-западное и северо-восточное) составила 6—10 см/с, а для остальных румбов — 3—5 см/с.

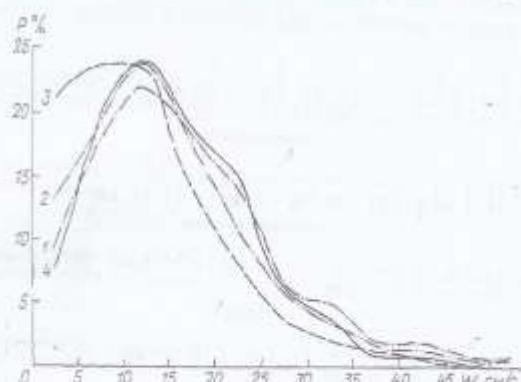


Рис. 12.3. Распределение вероятности P скорости течения W по данным наблюдений на плавмаяках Астраханском приемном (1961—1975 гг.) (1—3) и Волго-Каспийском (1962—1966 гг.) (4) на разных горизонтах: 1 — 0 м; 2 — 5 м; 3 — 8 м; 4 — 9 м.

В межгодовых изменениях кризой распределения вероятностей модуля скорости течения наибольшие характерны для малых скоростей (градации 0—1, 5—9 см/с).

Чем больше повторяемость направления течения данного румба, тем больше средняя скорость по данному направлению. Обычно наибольшую среднюю скорость имеют течения, идущие вдоль генерального направления береговой черты или изобат, а наименьшую — по нормали к ним.

12.1.7. Водообмен между западной и восточной частями Северного Каспия

Водообмен между западной и восточной частями Северного Каспия характеризуется режимом течения на Кулалинском пороге. Этот порог представляет собой возвышенность с глубинами 2,0—4,5 м и отделяет обширную Уральскую борозду (с глубинами 5,0—8,5 м), расположенную восточнее него, от западных районов Северного Каспия [372].

Течения на Кулалинском пороге в основном определяются ветром. Составляющие течения, создаваемые стоком Волги и пресным балансом восточной части Северного Каспия, на один-два порядка меньше составляющей ветрового течения. Коеффициент корреляции между устойчивым ветром и течением достигает в зависимости от румба 0,75—0,85.

Для изучения режима течений и водообмена использованы материалы наблюдений ГОИНа и Астраханской ГМО в 1955—1988 гг. на многосугодочных станциях и разрезах на Кулалинском пороге (более 200 сут).

Однаковый по направлению ветер на всем разрезе (Кулалинского порога) наблюдался в 80 % случаев, при этом в 61 % случаев направления течений по всему разрезу практически совпадали с направлением ветра, в 12,5 % случаев — не совпадали, и в 6,9 % — не совпадали только в поверхностном слое.

При устойчивых ветрах со скоростью более 5 м/с ветровое течение на Кулалинском пороге в основном соответствует направлению ветра или отклоняется от него вправо или влево не более чем на 45°. При слабых, неустойчивых по времени ветрах перенос вод незначителен и им можно пренебречь.

Ветры от северо-северо-запада до юго-востока (через восток) вызывают течения, направленные в западную часть Северного Каспия, а ветры остальных румбов — в восточную. Наибольшую повторяемость (13—15 %) на Кулалинском пороге имеют течения вдоль большой оси Северного Каспия — в секторах ССВ — ВСВ и Ю — ЮЮЗ. Примерно в 70 % случаев на пороге отмечается устойчивое ветровое течение, в 12 % — градиентные течения, в 18 % — слабые, неустойчивые течения.

При устойчивом ветре на Кулалинском пороге более 80 % времени наблюдаются также устойчивые односторонние течения. Именно такие периоды определяют условия водообмена между восточной и западной частями моря.

При неустойчивых, слабых течениях, когда отмечается смена ветра и происходит перестройка направлений течений, на пороге могут появляться двухслойные и двух-, трехструйные потоки, однако повторяемость таких случаев мала (около 10 %).

В эти периоды существенного переноса вод через порог не происходит.

Ветровые течения на пороге создают нагон или сгон в восточной части моря. На фазе затухания скорости ветра или изменения его направления наблюдаются градиентные течения в виде компенсационного потока обратного направления.

Двухструйная циркуляция вод на Кулалинском пороге в результате поперечной неравномерности скорости ветра может возникать только в исключительных случаях и в целом не имеет решающего значения в водообмене.

Вследствие мелководности Кулалинского порога (менее 5 м) течения здесь, как правило, однослойные, развитие придонных противотечений затруднено. В 89 % случаев наблюдений течение у дна отклоняется от поверхности не более чем на 45°.

Следовательно, механизм водообмена можно представить следующим образом: все сечение пролива над порогом обычно занято односторонним потоком с относительно одинаковыми скоростями. Компенсационное градиентное течение появляется после прекращения активного действия ветра в определенном направлении. На пороге в основном происходит чередование движения вод в западном и в восточном направлениях.

Четко выделяются две группы периодов в процессе переноса вод: периоды продолжительного устойчивого переноса вод в одном направлении при устойчивом ветре одного направления и кратковременные (обычно несколько часов) периоды смены направления устойчивого переноса вод, т. е. перестройки процесса водообмена через Кулалинский порог. Из 170 проанализированных случаев разового одностороннего движения вод на пороге по многосугодочным станциям за 1955—1982 гг. 53 % (23 % на запад, 30 % на восток) относились к перестройке устойчивых периодов, объем таких разовых переносов вод через порог был менее 0,01 км³.

Дальность переноса вод $W_{cp} \Delta t$ с востока на запад за время движения вод в одном направлении через порог изменялась в диапазоне от 5 до 100 км, причем 61 % повторяемости приходится на интервал 5—20 км. С запада на восток дальность переноса изменялась в диапазоне 35—40 км, повторяемость диапазона 5—20 км составляет 64 %. При средней скорости ветра 6,5 м/с течение переносит воды в одном направлении на расстояние до 10—12 км.

Средняя продолжительность устойчивого движения вод в одном направлении равна 37 ч, а средняя скорость при этом — 15,4 см/с. Средний объем переносимых за этот период вод составляет 6,33 км³. В среднем наиболее устойчивы течения восточных (99 ч) и западных (36 ч) румбов. Для 79 % случаев устойчивых периодов одностороннего движения вод через Кулалинский порог объем одноразового водообмена изменялся от 2,0 до 6,0 км³.

Сравнение объемов одноразового ветрового водообмена и водообмена, обусловленного изменениями водного баланса восточной части моря, показывает, что за 1,5—2,0 сут в результате ветрового водообмена в эту часть моря поступает в среднем такой же объем вод, как и за весь год в результате изменения составляющих водного баланса.

Установившейся двухсторонней циркуляции вод на Кулалинском пороге не отмечается, поскольку время действия устойчивого ветра одного направления мало и она не успевает развиться.

По расчетам Ю. И. Компанейца [216] результирующий водообмен равен в среднем за безледный период 26 км^3 и направлен из восточной части моря в западную. Однако это противоречит более

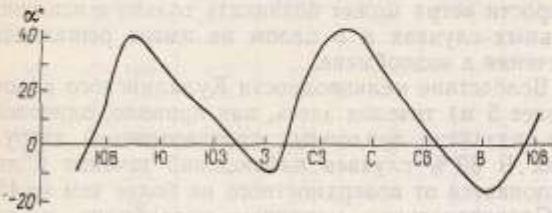


Рис. 12.4. Зависимость угла отклонения α поверхности течения от направления устойчивого ветра на Кулалинском пороге (ст. V, глубина 4,1 м).

корректным расчетам водообмена по уравнению водного баланса восточной части моря [131].

Для расчета водообмена между западной и восточной частями Северного Каспия, обусловленного ветром, наиболее целесообразно использование зависимости характеристик течений на Кулалинском пороге от поля ветра (атмосферного давления). Основной трудностью применения этого метода является отсутствие детального поля ветра или атмосферного давления над Северным Каспием, особенно в восточной части, где вообще отсутствуют гидрометстанции.

Использовать «объемный» метод расчета водообмена для Северного Каспия также, к сожалению, не представляется возможным, поскольку с 1964 г. в его восточной части не проводятся наблюдения за уровнем воды. Таким образом, единственный способ эмпирического решения задачи о водообмене через Кулалинский порог — установление по натуральным данным (многосуточные наблюдения) для нескольких точек разреза о. Кулалы — о. Укатный зависимости характеристик течений от ветра, наблюдавшегося на судне синхронно с течениями. Затем

Таблица 12.10

Повторяемость (%) направлений поверхностного течения в зависимости от направления и повторяемости ветра на Кулалинском пороге (ст. V) за 1955—1986 гг.

Направление течения	Направление ветра									
	C	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль	
	Повторяемость ветра, %									
	13,7	18,3	12,3	6,3	6,8	9,0	16,2	12,2	14,1	
C	2,5	2,5	0,9	25,5	28,0	9,3	1,8	3,3	12,8	
СВ	9,2	5,4	0,4	11,2	33,1	60,5	30,8	10,4	16,9	
В	5,0	4,7	0,9	0,9	4,2	16,8	45,0	20,8	9,9	
ЮВ	10,9	1,6	2,3	1,8	—	2,3	14,9	33,0	4,3	
Ю	34,4	7,2	5,2	2,7	4,2	1,2	3,1	23,1	18,5	
ЮЗ	33,1	55,0	10,1	9,1	3,4	1,2	2,1	5,7	12,5	
З	2,5	17,6	71,5	20,0	8,5	1,2	1,1	—	12,5	
СЗ	0,4	4,7	3,3	26,4	12,7	3,5	—	1,0	4,3	
Слабое течение	2,0	1,3	0,4	1,8	5,9	4,0	0,7	2,7	18,3	

определяется соотношение характеристик ветра на многосуточных станциях и «вековом» разрезе II с его характеристиками на ГМС Остров Кулалы, расположенной в створе «векового» разреза.

Относительно малая площадь Северного Каспия, однородность над ним поля атмосферного давления и ветра обуславливают то, что течение на Кулалинском пороге, особенно при умеренных и сильных ветрах, определяется ветром в районе порога.

В основу метода расчета течений и водообмена через Кулалинский порог положены полученные Н. А. Скрипниковым [363] зависимости характеристик течений от ветра и режимные особенности течений. При расчете водообмена использовался вывод о том, что на пороге, особенно при умеренных и сильных ветрах, течение относительно однородны по направлению и скорости.

На основе статистической обработки многолетних материалов наблюдений на синхронных многосуточных станциях установлено вероятностное распределение направлений течения для каждого румба ветра с учетом скорости ветра. Для каждого румба установлена также зависимость скорости течения от скорости ветра (ветровой коэффициент).

В дальнейшем по этим зависимостям и климатическим характеристикам ветра на ГМС Остров Кулалы рассчитывались характеристики течений на реперной многосуточной станции V за безледный период. В первом приближении принималось, что средняя по вертикали скорость течения на ст. V равна средней скорости течений по всему профилю о. Укатный — о. Морской.

Для определения зависимости направления течения от ветра выбирались все наблюдения за течениями на многосуточных станциях V и XIV, соответствующие устойчивым ветрам. Устойчивым считался ветер, не изменяющий своего направления в течение 6 ч и более и мало изменяющийся по скорости. В результате были получены направления течения для всех румбов при устойчивом ветре (рис. 12.4). Такая зависимость устанавливается для периода развития ветра (до максимума скорости), т. е. когда резко преобладает ветровое течение.

По повторяемости ветра, осредненного по станциям Остров Кулалы и Остров Укатный, рассчитана повторяемость направлений течений на Кулалинском пороге за безледный период (табл. 12.10).

Для определения мгновенных расходов воды через данный профиль средняя скорость течения проектировалась на ось северо-восток — юго-запад. Затем с учетом площади живого сечения между островами Укатным и Морским ($\omega = 309 \times 10 \text{ м}^2$ при уровне, равном $-28,5 \text{ м}$) и значения проекции средней скорости течения, рассчитывались мгновенные расходы воды, поступающей в западную или восточную части Северного Каспия. Для приближенного расчета объемов вод, поступающих за период однородного переноса в западную или восточную части Северного Каспия через Кулалинский порог, использовалась повторяемость продолжительности этих периодов, полученная по наблюдениям на ст. V (180 сут). Затем была определена повторяемость рассчитанных значений [372].

В среднем за сутки водообмен через Кулалинский порог равен $2,13 \text{ км}^3$. За месяц ветровой водообмен ориентировочно равен $35—40 \text{ км}^3$. За без-

ледный период водообмен между восточной и западной частями Северного Каспия составляет примерно $\pm (340-380)$ км³.

Основные изменения в водообмене между западной и восточной частями могут происходить в результате колебаний уровня моря, приводящих к изменению площади живого сечения «пролива» над Кулалинским порогом.

В первом приближении можно считать, что изменение водообмена будет происходить пропорционально изменению сечения пролива. Например, при падении уровня моря участок водообмена в проливе смещается от о. Морского к северу. Ориентировочный расчет показал, что при уровне —29,5 м водообмен за безледый период года составит около ± 250 км³, а при уровне —30,5 м он будет равен ± 135 км³.

При повышении уровня моря площадь живого сечения над порогом увеличивается, соответственно возрастает и водообмен. Так, при повышении уровня моря до отметки —27 м водообмен за безледый период года будет равен примерно 450—500 км³.

12.1.8. Основные черты ветровой циркуляции вод

Наряду с исследованием течений Северного Каспия по натурным данным представляет интерес анализ изменчивости ветровых течений с помощью численного моделирования. Это, в частности, обусловлено недостаточностью синхронных и продолжительных наблюдений за течениями в Северном Каспии, особенно при сильных и штормовых ветрах.

В настоящее время имеется ряд работ, посвященных численному моделированию течений Северного Каспия. Г. В. Ржеплинский [336] предложил расчетную схему стационарных течений на основе упрощенной модели. Г. Я. Шкудова [400] ввела в расчеты переменный по пространству коэффициент вертикального турбулентного обмена, сток рек и типовые синоптические поля. Она показала, что задание потоков воды на границе со Средним Каспием существенно для стационарной циркуляции только в непосредственной близости от границы.

Однако сравнение с наблюдениями показало ограниченность результатов, получаемых по стационарным моделям. Например, двухслойность потоков, получаемая в этих моделях, так же, как и стационарность течений, в Северном Каспии отмечается довольно редко. Поэтому начиная с 1973 г. (например, в работе И. Ф. Гетмана [106]) расчеты течений проводятся с использованием нестационарных уравнений. С. М. Перминов и И. И. Чечель [304] решали систему уравнений теории мелкой воды посредством неявной численной схемы с применением метода переменных направлений. Наряду с описанием характера циркуляции вод моря при

выбранных ветровых полях они приводят и расчеты водообмена между частями моря.

Уравнения теории мелкой воды использованы и в работе Е. В. Будиловой, В. Н. Носова и А. Т. Терехина [56]. В ней приводятся схемы циркуляции и карты уровня Северного Каспия для четырех направлений ветра скоростью 7 м/с через сутки после начала действия ветра. В указанных работах, однако, не содержится обобщенного описания схем ветровой циркуляции Северного Каспия, полученных на основе гидродинамических расчетов. Кроме того, не рассматривалась вертикальная структура нестационарных ветровых течений. Исключение представляет работа И. Ф. Гетмана [107], где вертикальная структура течений рассмотрена с позиций возможности и методики ее расчета.

В настоящей работе для расчетов течений использована гидродинамическая модель, применявшаяся ранее для определения ветровых течений и сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря [37, 38]. В качестве исходных уравнений были взяты линейные уравнения Рейнольдса. При этом уровень моря определялся отдельно путем решения этих уравнений, предварительно проинтегрированных по глубине. Коэффициент вертикального турбулентного обмена A_z рассчитывался по формуле

$$A_z = 0,0036W_0(H + \zeta). \quad (12.1)$$

где W_0 — скорость течения на поверхности моря, определяемая с предыдущего шага по времени, см/с; $(H + \zeta)$ — текущая глубина моря, см. Это выражение получено из формулы А. И. Фельзенбаума $A_z = 0,54VH$ (где V — скорость ветра), в которой автор использовал ветровой коэффициент, равный 0,015. Подставляя в формулу Фельзенбаума вместо скорости ветра снова скорость течения на поверхности, получим указанную выше формулу.

Акватория Северного Каспия представлена в виде сеточной области с шагом по расстоянию 25 км, в каждой узловой точке которой задавались фактические глубины и параметры ветра. На южной границе сеточной области ($42^{\circ}30'$ с.ш.) в пределах акватории Среднего Каспия колебания уровня полагались равными нулю. Такое предположение близко к наблюдаемым в природе условиям, поскольку глубины вдоль границы достигают 200—400 м и колебания уровня здесь весьма малы. Для уменьшения вносимых при этом искажений в расчеты движений воды на акватории Северного Каспия значения уровня в пограничной части сеточной области умножались на коэффициент, изменяющийся линейно от 1 до 0. Физически это соответствует введению плавно нарастающей вязкости, обеспечивающей диссиацию энергии с удалением расчетной точки от южной границы к северу. Ширина зоны диссиации составляет 125 км, а ее северная граница проходит по склону Мангышлака.

Таблица 12.11

Изменение скорости ветра над Северным Каспием при сильных и штормовых ветрах
(по данным Е. М. Копайгородского)

Направление ветра . . .	С	В	В	ЮВ	ЮВ	ЮВ	З	СЗ	СЗ	СВ
Скорость ветра, м/с . . .	11—19	9—19	12—26	11—19	14—21	6—20	10—16	11—17	16—23	11—17
Направление возрастания скорости . . .	С—Ю	Ю—С	СВ—ЮЗ	Ю—С	ЮЗ—СВ	СВ—ЮЗ	С—Ю	З—В	ЮЗ—СВ	СЗ—ЮВ
K_n . . .	0,42	0,53	0,54	0,42	0,39	0,70	0,38	0,35	0,38	0,35

ского порога, представляющего естественную границу между Северным и Средним Каспиям.

Параметры ветра снимались с карт типовых полей ветра северной части Каспийского моря. Для расчета выбраны типовые ситуации, которые отвечают сильным и штормовым (более 10 м/с) ветрам преобладающих направлений (западного, северо-западного, восточного, юго-восточного) и представляют наибольший интерес при изучении протекающих в море динамических процессов (табл. 12.11). Краткая характеристика этих полей, дающая представление о распределении скорости ветра над морем, приведена в таблице, где также указаны значения критерия пространственной неоднородности ветра K_n , который определяется из отношения

$$K_n = (V_{\max} - V_{\min})/V_{\max}, \quad (12.2)$$

где V_{\max} и V_{\min} — соответственно наибольшая и наименьшая скорости ветра над акваторией.

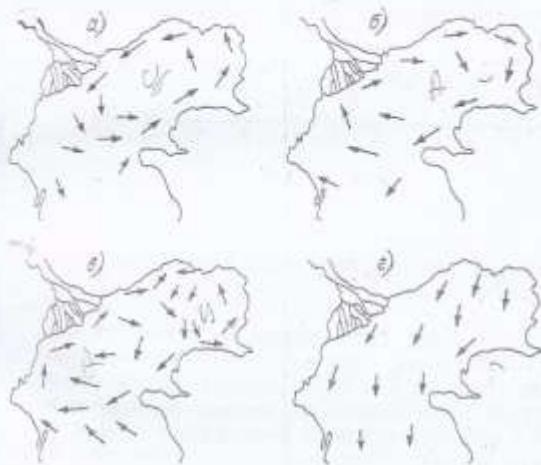


Рис. 12.5. Основные типы циркуляции вод в Северном Каспии.
а — циклонический; б — антициклонический; в — смешанный; г — продольный.

Чем больше K_n , тем сильнее влияние неоднородности поля ветра на динамику вод моря.

Анализ полей течений, полученных в результате расчетов по приведенным в таблице полям ветра, позволяет выделить четыре основных типа циркуляции вод в северной части Каспийского моря (рис. 12.5):

а) циклонический. Формируется при восточном ветре с поперечно неоднородной структурой и критерием K_n более 0,5. Скорость ветра возрастает с юга (9 м/с) на север (19 м/с). Представлен одним обширным круговоротом с движением вод против часовой стрелки, захватывающим всю акваторию Северного Каспия. Наибольшие скорости течений (35 см/с) отмечаются на северной периферии, наименьшие (не более 12 см/с) — в центральной части и на южной периферии круговорота;

б) антициклонический. Формируется при восточном ветре с поперечно неоднородной структурой и $K_n = 0,54$. Скорость ветра (в отличие от предыдущего типа) возрастает с севера (12 м/с) на юг (26 м/с). Представлен одним круговоротом с движением вод по часовой стрелке. Наибольшие ско-

рости течений (50 см/с) отмечаются на южной, наименьшие (до 15 см/с) — на северной периферии круговорота;

в) смешанный. Формируется при юго-восточном ветре с поперечно неоднородной структурой и $K_n = 0,7$. Скорость ветра возрастает с северо-востока (6 м/с) на юго-запад (20 м/с). Представлен двумя круговоротами: большим антициклоническим в западной части Северного Каспия и небольшим циклоническим — в его восточной части. Наибольшие скорости течений отмечаются на южной периферии антициклонического (60 см/с) и северной периферии циклонического (30 см/с) круговорота, наименьшие — в их центральной части (не более 8 см/с), на северной периферии антициклонического (до 12 см/с) и южной периферии циклонического (до 15 см/с) круговоротов. Во всех описанных выше типах циркуляции преобладают два основных типа вертикального распределения течений. Первый из них характеризуется постоянным уменьшением скорости с глубиной и приурочен к тем районам, где течения направлены по ветру. Второй тип наблюдается там, где есть поток, направленный против ветра. Его отличительной особенностью является наличие максимума скорости на горизонте $h = (0,6 \dots 0,8)z$ (где z — глубина моря в точке), который может превышать скорость течений на поверхности примерно на 25—40 %;

г) продольный. Формируется при продольно неоднородных полях ветра (с любыми значениями критерия K_n) или поперечно неоднородных полях со значениями критерия K_n менее 0,5. Представлен хорошо выраженной двухслойной циркуляцией в южной части моря. В верхнем слое здесь течение направлено по ветру, в нижнем — против ветра. На эпюре течений имеется два максимума: на поверхности и в осевой части компенсационного потока. Первый из этих максимумов значительно больше второго (в 2—2,5 раза). Минимумы скорости находятся у дна и вблизи границы раздела двух разнонаправленных потоков.

Пространственная неоднородность поля течений по сравнению с остальными типами циркуляции (при которых скорости течений меняются в очень широком диапазоне — от 0 до 100 см/с и более) относительно невелика.

Например, при северном типе шторма с продольно неоднородной структурой поля ветра (скорость ветра возрастает от 11 м/с на севере до 19 м/с на юге, $K_n = 0,42$) скорости поверхностных течений по акватории изменяются от 30 до 50 см/с.

Расчеты течений, выполненные по модельным полям ветра с поперечно неоднородной структурой и разной степенью неоднородности ($K_n = 0,2 \dots 0,8$), показали, что переход от вихревых типов циркуляции к продольным (или наоборот) совершается не постепенно, а в очень узком диапазоне K_n (от 0,5 до 0,6). Это означает, что даже очень небольшие изменения в распределении скорости ветра над морем могут привести к кардинальной перестройке всей структуры ветровых течений.

Поэтому при одной и той же синоптической ситуации один тип циркуляции вод может сменяться другим или в море могут возникать какие-то смешанные или переходные типы циркуляции, сочетающие в себе различные признаки четырех основных типов.

12.2. Течения средней и южной частей Каспийского моря

Исследованиями установлено существование различных видов течений в Каспийском море: ветровых, плотностных, градиентных, стоковых [212, 223, 245, 276, 394, 406, 407]. Однако состояние изученности течений не позволяет составить о них достаточно полного представления.

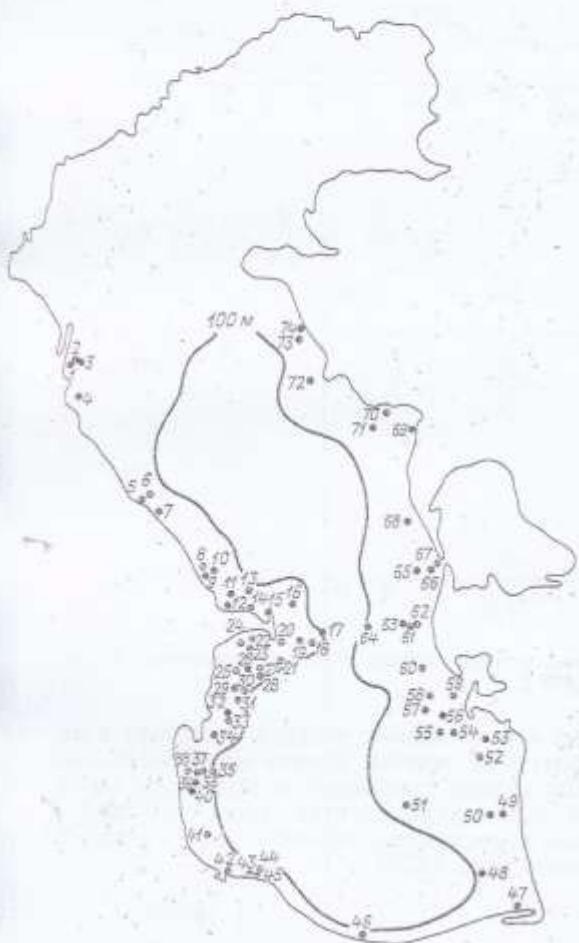


Рис. 12.6. Схема расположения многосуточных станций.

К настоящему времени проведено довольно большое количество измерений течений с помощью самописцев БПВ-2, но сосредоточены они в основном в прибрежной зоне средней и южной частей моря, в пределах глубин 30—50 м, реже до 100 м. Подавляющее большинство измерений выполнено судами Азергидромета в последние десятилетия. Течения измерялись в основном на многосуточных якорных станциях продолжительностью от 3 до 16 сут с дискретностью 30 мин. Часть этих данных (по 1985 г.) была использована при составлении справочника «Гидрометеорологические условия шельфовой зоны Морей СССР. Том 2. Каспийское море» (1986 г.), в котором, кроме данных измерений течений, представленных в виде повторяемости скоростей и направлений, дана характеристика течений в некоторых прибрежных районах.

В данной главе монографии представлены результаты исследования ветровых и градиентных течений и мезомасштабной изменчивости на основе данных натурных наблюдений.

Для анализа было привлечено около 100 многосуточных станций (многие из них повторялись неоднократно), выполненных с 1975 по 1988 г. (рис. 12.6). Обработка материалов наблюдений проводилась методами математической статистики. Большое внимание было уделено исследованию временной изменчивости ветровых течений.

Из-за малочисленности наблюдений за течениями в открытых глубоководных районах моря схема течений для них была получена на основе численного моделирования. Расчеты выполнены в ГОИНе.

12.2.1. К истории изучения течений

Первая схема течений Каспийского моря помещена в локции, составленной Н. Н. Пущиным (1877 г.). Материалами для локции и схемы течений (рис. 12.7 а) послужили наблюдения, проведенные во время гидрографических экспедиций под руководством Н. А. Ивашиццева в 1854—1874 гг.

В 1904 г. А. А. Лебединцевым была составлена схема течений моря по данным «бутылочной почты» и небольшого количества наблюдений, проведенных с помощью поплавков и вертушки Экмана (рис. 12.7 б). Полученная им схема в основном повторяет схему Н. Н. Пущина, отличаясь от нее наличием циклонического круговорота в южной части Каспия. Лебединцев считал основной причиной формирования циркуляции вод Каспия сток рек северной части моря весной и в начале лета.

В 1904, 1914—1915 гг. Н. М. Книпович провел обширные экспедиционные исследования гидрологических и биологических условий Каспийского моря. По распределению температуры, солености и кислорода он составил схему течений средней и южной частей Каспийского моря (рис. 12.7 в). Им были использованы и данные наблюдений, полученные Лебединцевым. Как и предшествующие авторы, он отмечает наличие кругового движения вдоль берегов, но, в отличие от них, выделяет два циклонических круговорота в средней и южной частях моря. Он полагал, что в центрах этих круговоротов находятся обширные пространства воды, лишенные какого-либо движения. В отличие от схем Пущина и Лебединцева, составленных только для поверхностного слоя, схема Книповича имеет в виду общее поступательное движение масс воды, захватывающее слой в области свала глубин. Книпович выделил четыре фактора, обуславливающие течения в Каспийском море: ветры, горизонтальные градиенты температуры воды, вращение Земли и рельеф дна. Из них основным он считает перемещение водных масс в результате разности температуры воды на севере и юге. Сила Кориолиса, по его мнению, выступает как фактор возникновения кругового течения против часовой стрелки. Относительно роли ветра в возникновении течений Книпович отмечал, что «ветры в общем выводят за год могут объяснить существование кругового течения и усиление его в холодное время года».

В 1927 г. было организовано Бюро по изучению течений Каспийского моря, одна из задач которого

состояла в создании общей схемы циркуляции воды в Каспийском море. С этой целью были обобщены накопленные ранее материалы, а также данные систематических наблюдений за течениями на нескольких плавмаяках и сведения о течениях,

мореплавателей «Течения Каспийского моря» (1929 г.), где отмечал, что основной причиной, вызывающей течения на Каспийском море, является ветер, в ряде районов направление течений близко к направлению ветра и скорость их увеличивается

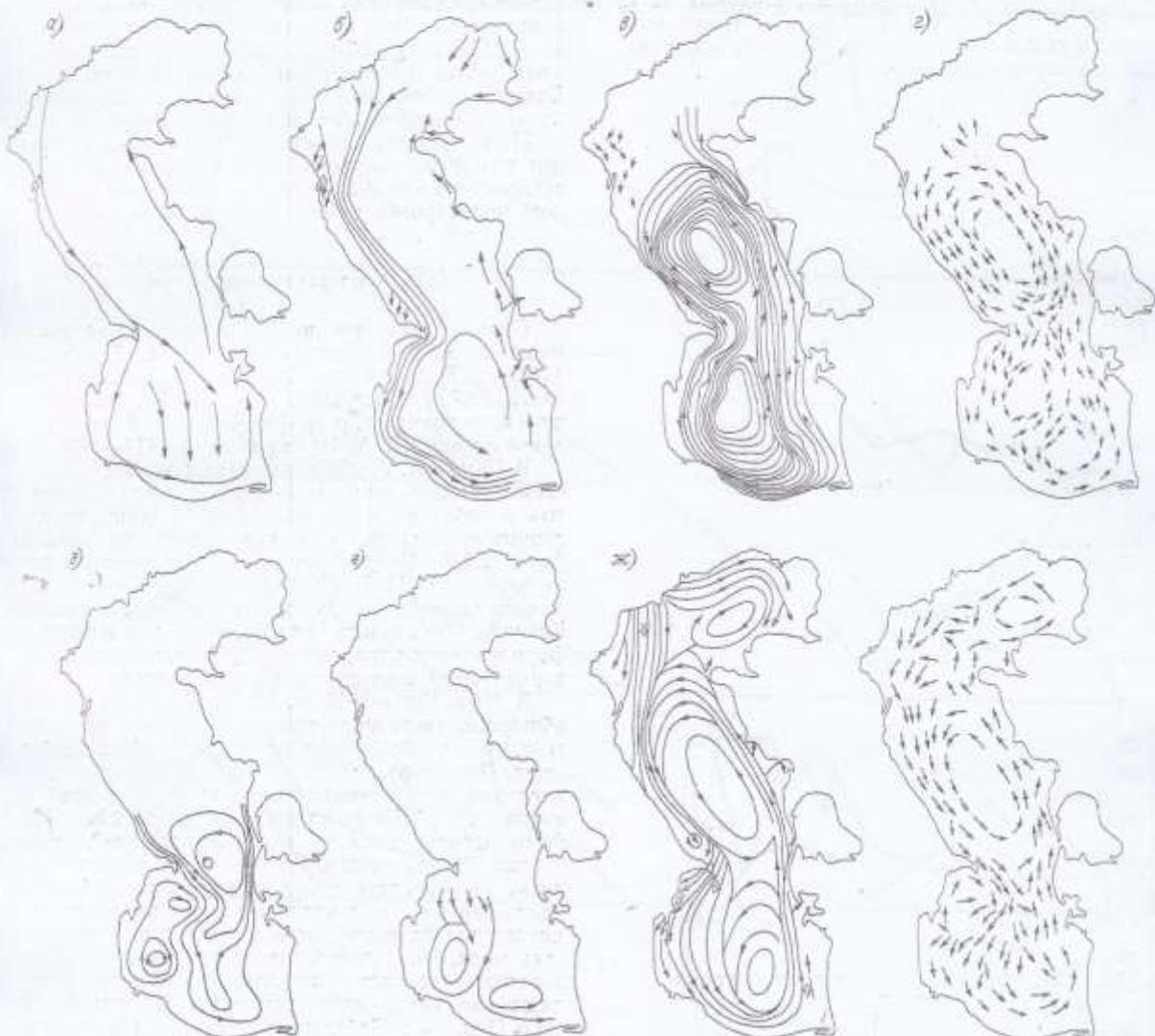


Рис. 12.7. Схемы течений Каспийского моря Н. Н. Пущина (1877) (а), А. А. Лебедицкого (1904) (б), Н. М. Кнаповича (1914—1915) (в), А. И. Михалевского (1931) (г), Г. Н. Зайцева (1935) (д), В. Б. Штокмана (1936) (е), В. Н. Зенина (1942) (ж), В. А. Леднева (1943) (з).

полученные по восстановлению прокладок судов. На основании всех этих материалов А. И. Михалевский в 1931 г. составил более полную схему течений Каспийского моря, охватывающую все его части. В Южном Каспии он выделил два циклонических круговоротов (рис. 12.7 г). Михалевский отмечал, что составленная им схема может изменяться в зависимости от ряда причин: весеннего стока р. Волги, развития ледяного покрова, зимних разностей температур и преобладания ветров того или иного направления [276].

На основании собранных Бюро материалов Н. Н. Струйский составил первое руководство для

с возрастанием скорости ветра, а у берегов существуют стоковые и нагонные течения.

По материалам гидрологических съемок Г. Н. Зайцев (1935 г.) построил динамическую карту Южного Каспия для горизонта 25 м (рис. 12.7 е).

В 1936 г. В. Б. Штокман показал, что с точки зрения кинематики жидкости циркуляция вод в южной части моря по Михалевскому маловероятна и должна иметь вид, изображенный на рис. 12.7 е.

В 1935—1937 гг. Азербайджанский филиал ВНИРО проводил съемки течений вертушкой Эк-

мана—Мерца у западного берега средней части моря. Полученные данные позволили Штокману в 1938 г. составить схемы течений в этом районе моря, хорошо согласующиеся с ветровыми полями и конфигурацией берега. Представляет интерес наличие севернее Апшеронского полуострова локального антициклического круговорота.

В. А. Зенин в 1942 г. дополнил руководство для мореплавателей «Течения Каспийского моря» на основе инструментальных наблюдений, проведенных в ряде районов моря. При этом наибольшее количество новых наблюдений имелось по западному побережью моря при почти полном их отсутствии у восточного побережья. Зенин также составил схему течений для всего моря. К причинам, вызывающим течения, он относил приток речных вод в море, неравномерное распределение плотности воды, изменение атмосферного давления над морем, а также ветер, который он считал основной причиной циркуляции вод Каспийского моря.

В общих чертах схема Зенина повторяет предшествующие схемы. В отличие от схемы Михалевского, у Зенина в Южном Каспии выделен один циклонический круговорот. Впервые на схеме, кроме направлений течения, были указаны наибольшие скорости течений, полученные по инструментальным наблюдениям (рис. 12.7 ж).

В. А. Зенин (1940 г.) построил динамические карты течения Каспийского моря для летнего периода для поверхностей 0, 10, 25, 50 дбар.

В 1943 г. В. А. Леднев составил схему ветровых течений. При ее составлении использованы все известные материалы наблюдений. В основном она не отличается от предшествующих схем (рис. 12.7 з).

Все перечисленные схемы течений имеют общие недостатки: они не привязаны к определенному периоду времени; при построении этих схем авторы использовали наблюдения, проведенные при различных ветровых условиях, и, кроме того, распределение по площади моря имеющихся наблюдений и сведений о течениях весьма неравномерное.

Расходились авторы схем и в определении основных причин возникновения течений. Пущин, Лебединцев и Киплович считали основными причинами такие факторы, как сток рек, испарение, распределение температуры воды и солености, ветровой режим. При этом роль ветра в основном сводилась к стабилизации или разрушению основной схемы течений. Михалевский, Зенин и Леднев отводили ветру главную роль в формировании течений. Однако составленные ими схемы не привязаны к какому-либо определенному направлению ветра.

Б. Лагутин [239] рассчитал повторяемость преобладающих направлений течений по сезонам года для господствующих направлений ветра — северного и южного. При этом вероятность того, что ветер данного направления вызовет совпадающие с ним по направлению течения, определялась введением эмпирического коэффициента [239]. Это первые режимные характеристики течений Каспийского моря, а не осредненного переноса вод, представленного в предшествующих схемах, в чем состоит их главное отличие.

Г. В. Ржеплинский [337], используя теорию Штокмана, составил схемы циркуляций поверхностных вод Каспийского моря для условий общего

переноса воздушных масс с юга на север и с севера на юг. Н. Д. Клевцова [205] по инструментальным наблюдениям за течениями, проведенным в различных районах средней и южной частей моря с 1936 по 1962 г., составила карты результирующих течений применительно к 4 типовым ветровым полям С. Д. Кошинского.

Исследование геострофических течений Каспийского моря с помощью динамического метода проведено А. Н. Косаревым с соавторами в ряде работ.

В 70-е годы с развитием численных методов были проведены расчеты течений в разных районах моря [141, 439].

В последние десятилетия производилось изучение режима течений нефтегазоносных районов шельфовой зоны.

12.2.2. Расчеты течений Среднего и Южного Каспия

В 1967—1968 гг. Ф. Г. Бахмаловым на основе метода А. И. Фельзенбаума проведены расчеты ветровой циркуляции в однородном по плотности море с учетом реальных географических условий Каспия — береговой линии и рельефа дна [31]. В качестве исходных данных по ветру были выбраны характерные типы ветровых полей по типизации С. Д. Кошинского.

В 1976—1977 гг. для изучения циркуляции вод Каспийского моря была впервые использована модель динамики бароклинического океана. Расчеты выполнены для случая отсутствия ветра и для двух типов преобладающих ветровых полей (северо-западного и юго-восточного) по классификации Кошинского [230].

Диагностические расчеты течений и уровня для Каспийского моря были выполнены в ГОИНе Г. В. Еремеевой по линейной квазигеострофической стационарной модели А. С. Саркисяна [354].

В качестве исходного материала послужили среднемноголетняя плотность σ_0 , осредненная по квадратам $30 \times 30'$ для февраля и августа [223], и глубины, осредненные по тем же квадратам. Среднемноголетнее месячное поле давления для этих месяцев выбиралось из «Комплексного гидрологического атласа Каспийского моря» [217]. Расчеты проводились для 14 горизонтов при $A_s = 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$.

Расчеты скоростей течений и превышения уровня были проведены при отсутствии ветра, для северо-западного и юго-восточного ветров, а также по среднемесячной барической обстановке за февраль и август. Эти месяцы были выбраны как средние для теплого и холодного сезонов года.

Результаты численных расчетов отражают две главные, известные из наблюдений особенности динамики вод бассейна: наличие циклонического круговорота в средней части Каспия и антициклического — в южной.

В случае отсутствия ветра летом в западной половине средней части Каспия четко выделяется циклонический круговорот (рис. 12.8 а). Скорости западной струи достигают на поверхности 25—30 см/с, а на восточной периферии круговорота уменьшаются до 10—20 см/с. Южнее Дербентской впадины от круговорота отходит струя со скоростями 10 см/с, направленная на юго-восток к Апшеронскому полуострову.

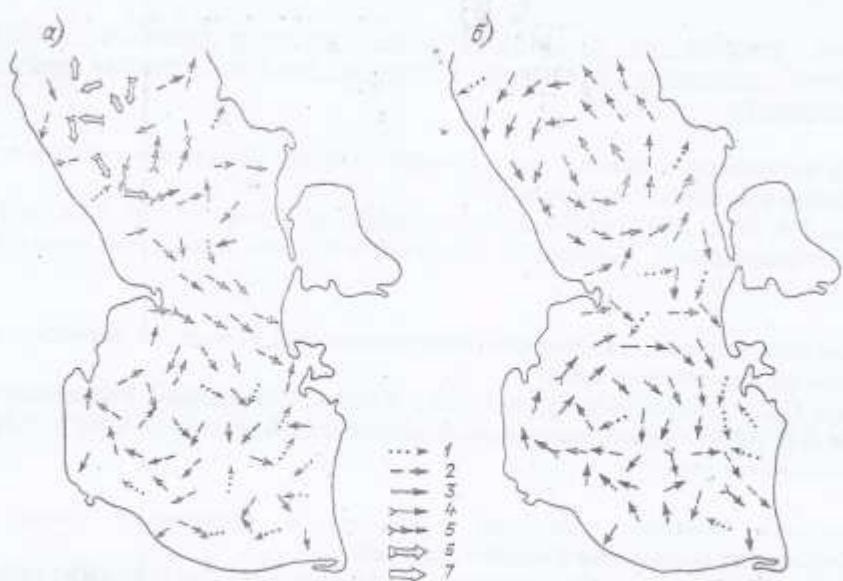


Рис. 12.8. Течения при отсутствии ветра в августе (а) и феврале (б) на горизонте 0 м.
1) 1-2 см/с; 2) 3-5 см/с; 3) 6-10 см/с; 4) 11-15 см/с; 5) 16-20 см/с; 6) 21-25 см/с; 7) 26-30 см/с.

В Южном Каспии циркуляция имеет антициклический характер со слабыми скоростями с центром близ западного берега. Вдоль западного берега воды движутся по направлению к Апшеронскому порогу, где происходит конвергенция и пере-

мешивание. В центральной части порога среднекаспийские воды проникают в южную часть моря со скоростями 5—10 см/с.

Зимой при отсутствии ветра циклоническое движение захватывает всю среднюю часть Каспия

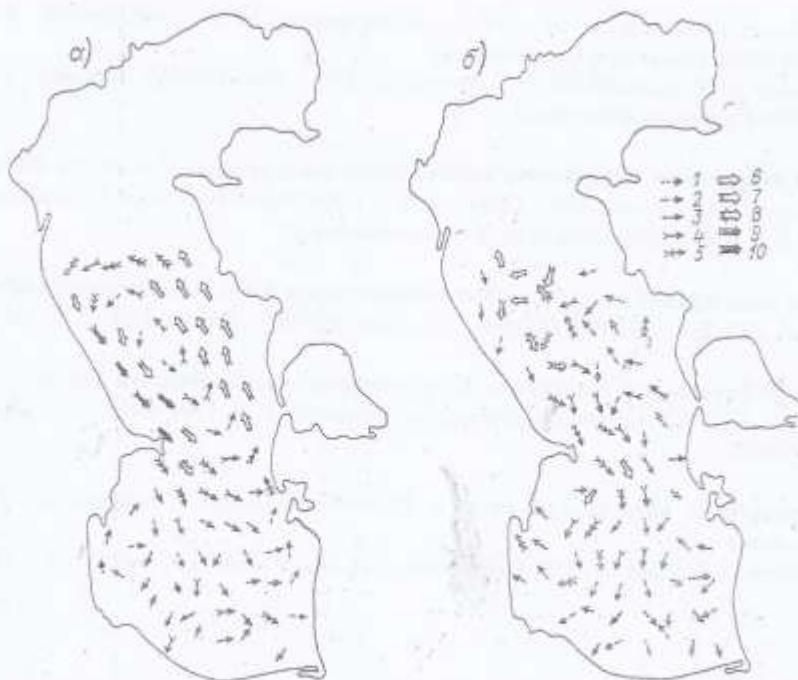


Рис. 12.9. Течения при среднемноголетнем поле ветра в феврале (а) и августе (б) на горизонте 0 м.
1) 0-2 см/с; 2) 3-5 см/с; 3) 6-10 см/с; 4) 11-15 см/с; 5) 16-20 см/с; 6) 21-25 см/с;
7) 26-30 см/с; 8) 31-35 см/с; 9) 36-40 см/с; 10) 41-45 см/с.

(рис. 12.8 б), но из-за уменьшения бароклиности моря скорости гораздо меньше, чем летом, порядка 10 см/с.

В центральном районе южной части Каспия течения направлены преимущественно на юг. В западной половине и в юго-восточном районе имеет место антициклоническое движение. Течения в южной части Каспия в случае отсутствия ветра слабые, со скоростями меньше 5 см/с, только южнее Куры и на юго-востоке в феврале отмечаются скорости 10—15 см/с.

При среднемноголетнем поле ветра в феврале (рис. 12.9 а) в средней части Каспия сохраняется четко выраженная циклоническая циркуляция: вода со скоростью 25—30 см/с движется вдоль восточного берега на северо-запад, а у западного берега скорости течений (в районе Избербаш—Апшеронский полуостров) достигают 40—50 см/с.

В центральном районе средней части Каспия скорость течения ослабевает до 10—15 см/с. Над Апшеронским порогом вода со скоростью 15—30 см/с поступает в южную часть моря.

Во всей южной части Каспия течения слабые (6—10 см/с). Юго-западная часть моря (между Апшеронским порогом и устьем Куры) занята антициклоническим круговоротом. Он проявляется и в юго-восточной части моря.

Летом (в августе) при среднемноголетнем ветре направление течений во всем море преимущественно юго-западное (рис. 12.9 б). В средней части Каспия циклоническое движение сохраняется, но максимальные скорости (20—30 см/с) преобладают в центральной части бассейна. Вдоль западного берега течение идет на юго-восток (10—15 см/с), пересекая Апшеронский порог широким фронтом со скоростью 18—25 см/с.

Антициклоническое образование у западного берега южной части Каспия смещается по сравнению с февралем к югу. В районе о. Огурчинского — слабая циклоническая циркуляция. Во всей южной части Каспия скорости летом несколько выше, чем в феврале.

Среднемноголетняя барическая обстановка в зимний период существенно повлияла в Среднем Каспии на увеличение скоростей в циклоническом круговороте (у западного и восточного берегов). В Южном Каспии центр антициклонической циркуляции сдвинулся к западу, а в центральной части происходит перенос вод к югу.

Летом учет ветра в основном не изменяет картину распределения скоростей в Среднем Каспии. Наблюдается некоторое увеличение скоростей у западного берега Среднего Каспия при подходе к Апшеронскому порогу и в центральном районе Южного Каспия.

Сравнение схем градиентных течений со схемами течений, полученных с учетом среднемноголетней барической обстановки, а также при юго-восточном и северо-восточном ветрах, показывает, что влияние ветра существенно оказывается в верхнем 10-метровом слое. На горизонте 10 м уже возникают компенсационные течения, направленные против ветра, а течения по ветру заметно ослабевают. В циклоническом круговороте средней части Каспия значительное уменьшение скоростей течений наблюдается лишь ниже горизонта 100 м.

На горизонте 50 м в средней части Каспия в августе скорости течения (10—30 см/с) выше, чем в феврале (6—10 см/с). В южной части, наоборот, скорости течений в августе ослабевают (2—4 см/с) по сравнению с февралем (5—10 см/с).

При анализе рельефа уровенной поверхности моря для февраля оказалось, что уровень средней части Каспия немного повышенный, в южной части наблюдается его понижение (2—10 см), а рельеф более сложный. Максимумы подъема (8—9 см) и понижения уровня приходятся на максимальные глубины моря (500—700 м). Области наибольшего понижения уровня (7—10 см) находятся у западного побережья южной части Каспия.

Летом рельеф уровенной поверхности по всему морю более сложный, хотя области повышения уровня в средней части и опускания в южной сохраняются. Максимальные отклонения уровня от невозмущенной поверхности составляют 20 см (подъем) и 7—8 см (опускание). Используемая модель дает рельеф уровенной поверхности, определяющийся в основном полем плотности и топографией дна.

Распределение вертикальных движений при учете стратификации вод дает в зимний период (среднемноголетнее поле давления за февраль) сильное опускание вод у западного берега южнее Апшеронского полуострова со скоростями $(2-2.5) \cdot 10^{-3}$ см/с, которое ослабевает с глубиной. Обширная область подъема вод пересекает среднюю часть Каспия с северо-запада на юго-восток и захватывает большую акваторию южной части Каспия. В этой области можно отметить три района с максимальными скоростями: у западного берега Среднего Каспия скорости подъема $3 \cdot 10^{-3}$ см/с, северо-восточнее Апшеронского полуострова и у восточного берега средней части моря $2.5 \cdot 10^{-3}$ см/с.

При изменении барической обстановки над морем летом пространственная картина вертикальных движений сильно меняется. В то же время можно отметить устойчивость положения зон максимальных вертикальных движений.

Анализ результатов численного моделирования в Каспийском море позволяет отметить, что ветер оказывает непосредственное воздействие на относительно тонкий поверхностный слой воды 0—10 м, ниже течения формируются под влиянием термохалинных факторов. Сезонная изменчивость поля течений проявляется в увеличении скоростей и более сложном их распределении летом, когда бароклиность слоев наибольшая.

12.2.3. Ветровые течения

Основная роль ветра в создании течений Каспийского моря общепризнана, однако из-за отсутствия достаточного количества необходимых натуральных наблюдений до сих пор не установлена. Трудность обусловлена тем, что, поскольку водная среда находится в непрерывном движении, возникающий ветер всегда встречает течения, вызванные предшествующим ветром или другими причинами. Вследствие этого при одинаковых ветровых условиях в одном и том же районе можно встретить течения разных направлений и скоростей.

Зависимости течения от ветра были исследованы по данным непрерывных измерений самописцами

Таблица 12.12

Число наблюдений N и число случаев течений P , совпадающих по направлению с ветром, по ежечасным многосуточным наблюдениям за год

Год	1975	1976	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	Сумма	Среднее
Скорость ветра до 10 м/с														
Скорость ветра от 10 до 15—17 м/с														
N	60	348	56	34	532	997	825	837	729	1494	1476	510	7898	—
P %	62	40	64	15	31	37	34	48	39	35	37	38	—	38
N	57	—	19	15	130	323	251	134	96	441	401	125	1992	—
P %	58	—	63	13	25	48	48	56	60	52	51	40	—	49

БПВ-2, выполненных на 99 многосуточных (от 3 до 15 сут) станциях с 1975 по 1988 г. в прибрежных районах моря. Всего было использовано около 10 тыс. ежечасных измерений течений на поверхности и ветра. Число случаев течений, совпадающих по направлению с ветром, определялось от-

при ветрах со скоростью до 10 м/с и более и число случаев (%) течений, совпадающих по направлению с ветром.

В среднем в прибрежных районах моря в рассматриваемый период времени при скоростях ветра менее и равных 10 м/с течения совпадали по на-

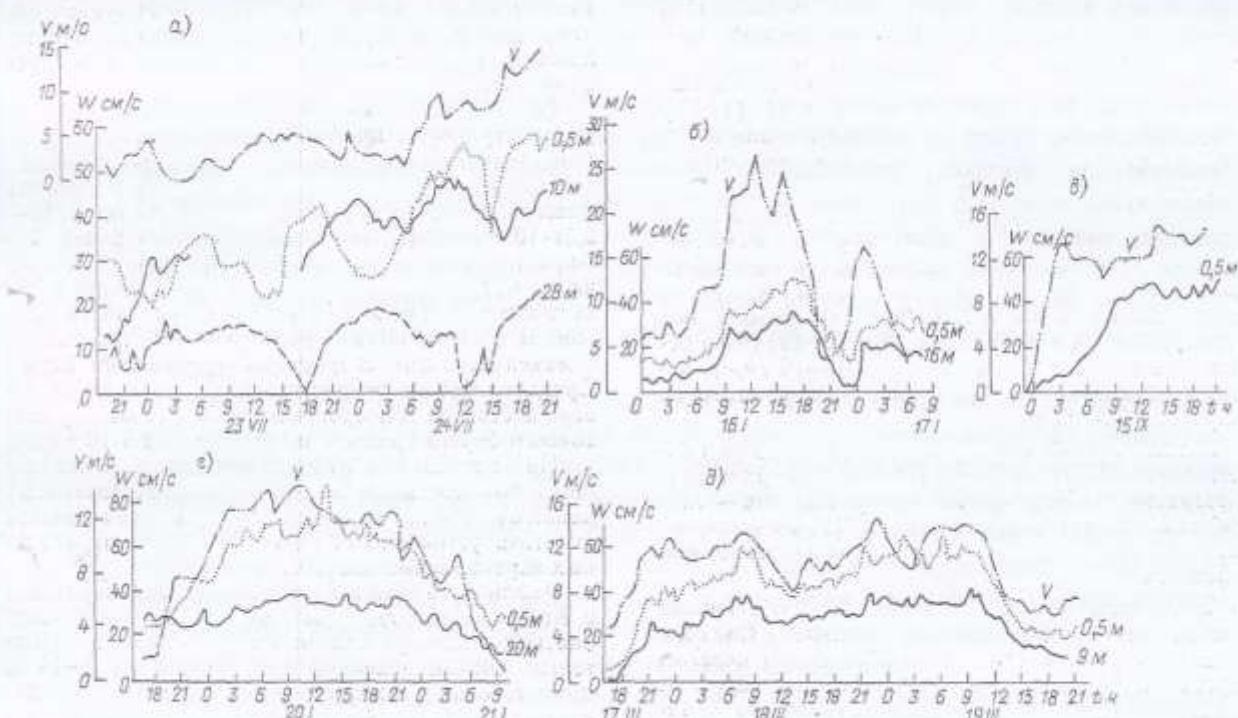


Рис. 12.10. Изменчивость скоростей ветра V и течений W по горизонтам в разных районах прибрежной зоны.
а — Набранз (ст. 6), глубина 30 м; б — Бузлыг (ст. 14), глубина 18 м; в — Нефтяные Камни (ст. 60), глубина 20 м; г — Баниковский архипелаг (ст. 3), глубина 23 м; д — Казахский залив (ст. 70), глубина 10 м.

дельно для скоростей ветра до 10 и более 10 м/с. Такое разделение обусловлено тем, что ветры со скоростями до 10 м/с преобладают в средней и южной частях моря, составляя в среднем 70—80 %, а в юго-восточной и юго-западной частях — до 90 %.

Около 80 % использованных наблюдений за течениями было выполнено при ветрах со скоростью менее 10 м/с и около 20 % — со скоростями от 10 до 15—17 м/с (реже при скоростях 20 м/с и более). К ветровым течениям, соответствующим действующему ветру, были отнесены случаи, когда течение отклонялось от направления ветра на угол не более $\pm 45^\circ$.

В табл. 12.12 показано число наблюдений с 1975 по 1988 г. (в 1977 и 1978 гг. наблюдений не было)

правлению с ветром в 38 % случаев, при скоростях более 10 м/с — в 49 %. Таким образом, процент совпадения течений с действующим ветром оказался несколько ниже по сравнению с одноразовыми измерениями течений и ветра.

Причина этого, по-видимому, в особенностях развития течений при различных ветровых условиях. Как показали непрерывные наблюдения за течениями и ветром, при слабых ветрах число случаев течений, направленных по ветру, составляет примерно 10 %, при устойчивом усилении ветра господствующего направления уже при скорости порядка 10 м/с около 80—85 % течений имеют направление, соответствующее действующему ветру. Существенная особенность ветрового режима —

временная неустойчивость, выраженная в частой смене направления, при незначительных колебаниях скоростей (с кратковременными усилениями до 10—15 м/с и более). Наблюдения, выполненные при таких ветровых условиях, показывают следующее. При смене направления ветра течение может сразу или через некоторое время изменить свое

скорости течения к скорости ветра и предполагающий прямую зависимость этих скоростей. Основатель теории дрейфовых течений Экман считал, что ветровой коэффициент $\lambda = 0.127/\sqrt{\sin \varphi}$ зависит только от широты места. Однако исследования, проведенные на морях, показали изменчивость ветрового коэффициента под влиянием глубины места.

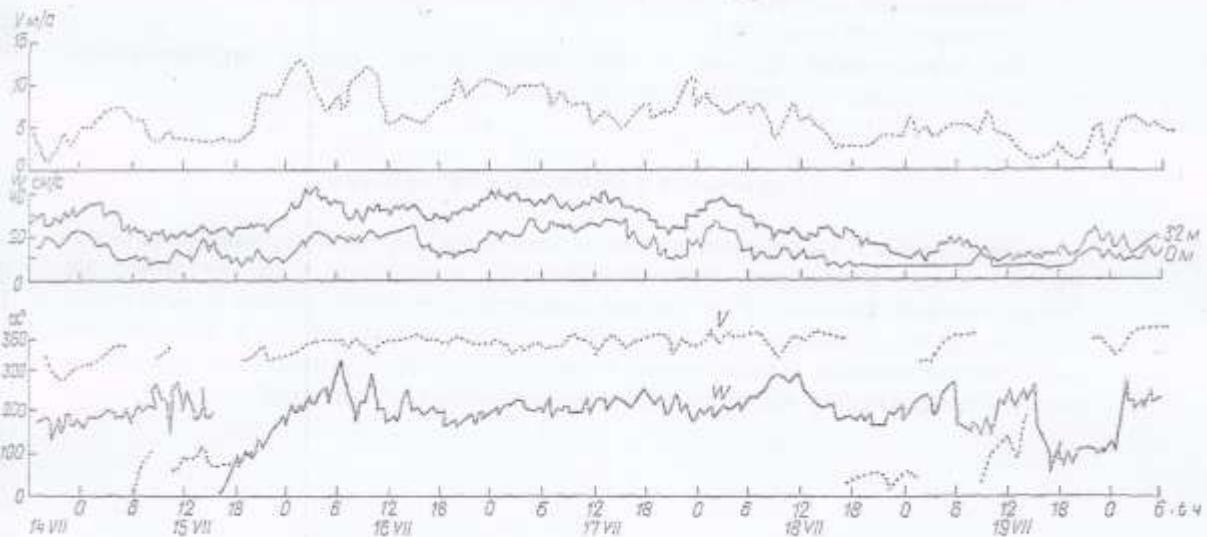


Рис. 12.11. Изменчивость скоростей ветра V и течений W по горизонтам и их направлениям α за период 14—20 июля 1984 г. южнее Нефтяных Камней ($40^{\circ}15'$ с. ш., $50^{\circ}55'$ в. д.), глубина 34 м.

направление, но может и сохранить его неизменным. Поэтому процент совпадения течений с ветром составляет 20—60 %.

Исследованиями достоверно установлена линейная зависимость между скоростями ветра и течениями на Каспийском море.

Линейный характер такой связи подтверждают непрерывные наблюдения за течениями и ветром, выполненные при усилении ветра до 15—20 м/с. Таких случаев за период наблюдений отмечено 35. В каждом отдельном случае зависимость скорости течения от скорости ветра выражена довольно четко, но общая для всех случаев связь между скоростями течений и ветра оказалась недостаточно тесной. Объясняется это тем, что при одной и той же скорости ветра в каждом отдельном случае наблюдались разные скорости течения. Так, начальная скорость усиливающегося ветра 0—5 м/с соответствуют скорости течения от 2 до 25—30 см/с, а при максимальной скорости ветра 17—20 м/с наблюдаются течения со скоростями от 50 до 70—80 см/с. Установлены и другие особенности в режиме скоростей развивающегося течения. Скорость течения не всегда увеличивается одновременно со скоростью усиливающегося ветра, в ряде случаев не совпадают по времени максимальные значения скоростей ветра и течения или скорость течения продолжает увеличиваться, хотя ветер начинает ослабевать [230] (рис. 12.10 и 12.11). Поэтому эмпирическую зависимость вида $W = \lambda V / \sin \varphi$ (где φ — широта места; W — скорость течения; V — скорость ветра) можно получить далеко не всегда. В этой формуле существенную роль играет ветровой коэффициент λ , представляющий отношение

силы ветра, его направления по отношению к берегу.

Для мелководных районов Каспийского моря (северная часть моря, Красноводский залив) были определены ветровые коэффициенты, значения которых колебались от 0,033 до 0,069 [407].

Б. Л. Лагутин по материалам наблюдений в районе Избербаша установил, что ветровой коэффициент уменьшается с увеличением силы ветра [239]. Это подтвердили наблюдения в стационарных пунктах Бакинского и Апшеронского архипелагов [204].

Непрерывные наблюдения за течениями и ветром показали значительные колебания ветрового коэффициента из-за большого разнообразия скоростей течений при одной и той же скорости ветра. При достижении ветром скорости 15 м/с и более ветровой коэффициент приближается к постоянному значению и зависит от преобладающих максимальных значений скорости ветра. По полученным данным значения ветрового коэффициента в прибрежной зоне колебались от 0,025 до 0,070 при ветре 15 м/с и более. В качестве примера приведены случаи изменения ветрового коэффициента при развитии течения, вызванного усиливающимся ветром (рис. 12.12).

По данным непрерывных многосуточных наблюдений были построены розы течений и кривые распределения скоростей течений для поверхности и придонного горизонтов прибрежной зоны (рис. 12.13). Всего было привлечено 26 659 измерений течений и ветра. Хотя использованные ряды наблюдений в разных районах имеют неодинаковую продолжительность и выполнены в различные

месяцы, розы течений неплохо согласуются с преобладающими ветрами в районах наблюдений. В районах, где направления течений в поверхностном и придонном горизонтах резко отличались, на схеме помещены течения на промежуточном горизонте (10 или 20 м).

многосуточные наблюдения и в других районах моря общей продолжительностью в ряде пунктов до 25—30 сут. Районы, по которым проводилась статистическая обработка данных о течениях, показаны на рис. 12.6. В табл. 12.13, содержащую основные статистические параметры, включены все

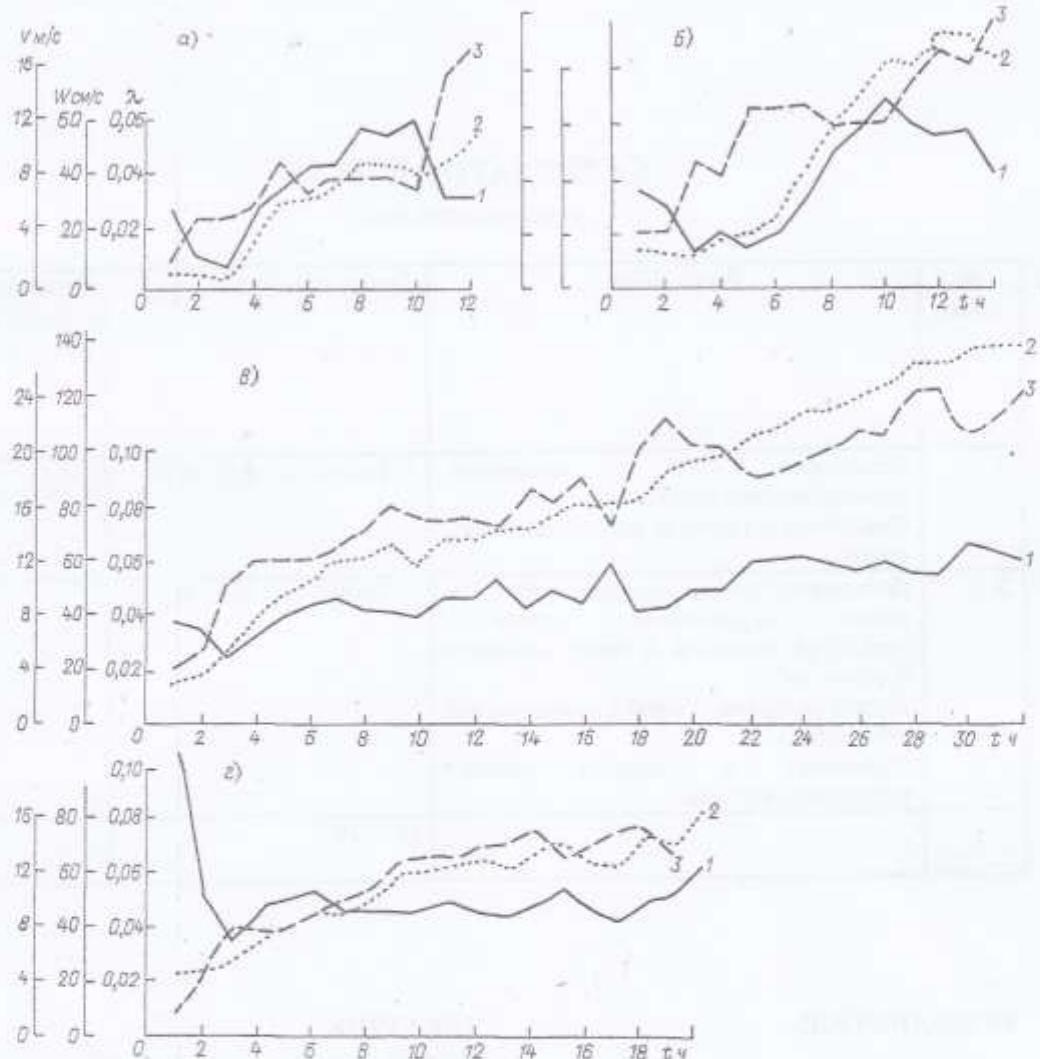


Рис. 12.12. Изменение ветрового коэффициента λ (1) при увеличении скоростей течений V (2) и ветра W (3) от начала усиления ветра до его максимума.
а — Ленинград, глубина 32 м, $\lambda_{0p} = 0.036$; б — взморье Кури (ст. 43), глубина 14 м, $\lambda_{0p} = 0.039$; в — взморье Кури (ст. 43), глубина 14 м, $\lambda_{0p} = 0.048$; г — Бакинский краиник, глубина 23 м, $\lambda_{0p} = 0.051$.

Средняя скорость течения — одна из основных режимных характеристик. Но, поскольку она получена по рядам разной длины, точность ее определения в разных районах неодинакова.

Представление о средних скоростях течений можно получить из табл. 12.13, где показаны средние скорости, вычисленные по наблюдениям на многосуточных станциях, которые выполнялись неоднократно.

Статистические характеристики течений в Каспийском море получены на основе наблюдений на 5 стационарных пунктах и 9 многосуточных станциях у восточного берега и в районе Нефтяных Камней [187]. В дальнейшем были привлечены

пункты, по которым проводился этот анализ, а также данные, полученные Б. Р. Зариповым и А. Н. Коцаревым [155, 156].

В большинстве пунктов наблюдений функции распределения скоростей течений в поверхностном слое или на отдельных горизонтах, а в некоторых пунктах по всему слою воды от поверхности до диаиза оказались близкими теоретическим законам распределения — нормальному или Максвелла.

При определении соответствия функций распределения теоретическим законам были использованы следующие критерии: для нормального распределения — критерий Корни [156], для распределения Максвелла — $\sigma/W = 0.5$. Отклонения от критерия

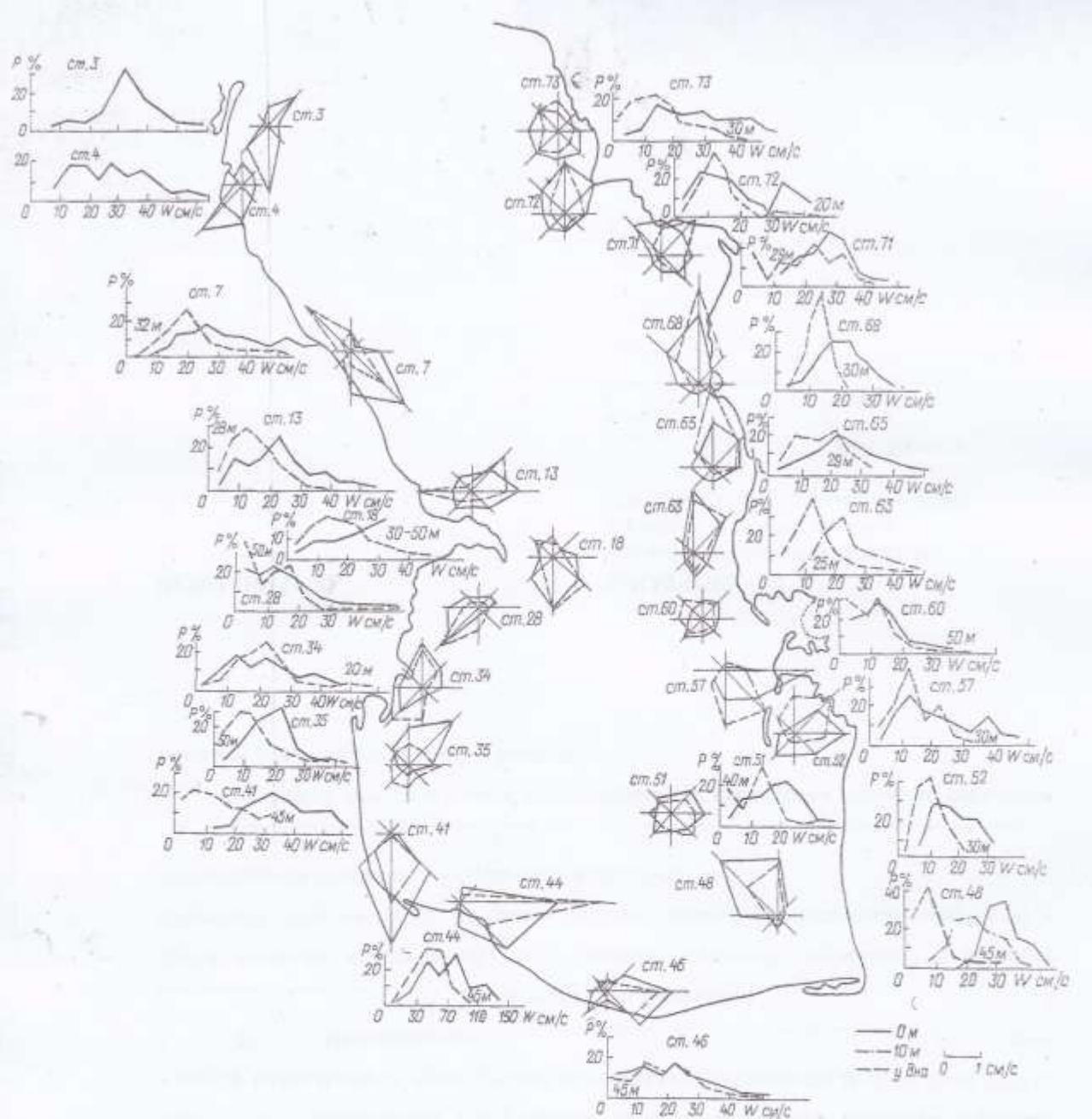


Рис. 12.13. Розы течений и повторяемость P скоростей течений на поверхностном и придонном горизонтах по данным мигающих наблюдений самописцем БПВ-2.

Станция	ГидроМ №	Месяцы наблюдений	Преобладающее направление ветра	Повторяемость направления ветра, %	Число наблюдений	Станция	ГидроМ №	Месяцы наблюдений	Преобладающее направление ветра	Повторяемость направления ветра, %	Число наблюдений
3	10-12	VI, X	В, ЮВ	42	585	51	45	V, VI	-	-	1069
4	12-15	VI	В, ЮВ	45	533	52	11	VI	С3	52	446
7	34	VI, VII	С3	35	578	57	33	X	-	-	553
13	32	I, IV, VII	Ю3	44	663	60	55	IV, VIII, IX, X	-	-	3394
18	37	I, III, VII	Ю3, Ю	40	2329	65	34	I, VII, XII	СВ	31	1760
26	53	III, VIII, IX, X	Ю, ЮВ	28	2614	68	32	VII	ЮВ	21	-
34	26	V, X, XI	ЮВ	-	791	71	32	-	В	25	422
35	58	IX, XI	В, СВ, ЮВ	40	889	71	32	III	ЮВ	20	485
41	50	VII, X	-	-	700	72	32	II, XII	СВ	15	-
44	50	XI	-	-	1069	73	32	-	В	19	538
45	50	VI, VIII, XII	-	-	4175	73	32	II, XII	С3, 3	33	-
48	50	VI, VII	-	-	583	73	32	V, VII, XII	В	45	780

Таблица 12.13

Статистические характеристики течений в средней и южной частях Каспийского моря

Номер станции	Район наблюдений	Период наблюдений	Глу- бин- я, м	Гори- зонт, м	Число случаев	\bar{W} см/с	Критерий нормального распреде- ления		Критерий распределе- ния Максвелла		Принятый закон распределе- ния
							$\frac{\sigma}{\bar{W}} \left(\frac{\bar{W}}{W_n} \right)$	отклонение, %	$\frac{\sigma_{\text{Брэд}}}{\bar{W}}$	отклонение, %	
1	Избербаш	1954—1969	11	0,5	7 929 *	4,6	1,28	18	0,52	4	Максвелла
2	б-ка Дарваза	1966—1958	7,5	0,5	4 562 *	4,2	1,16	26	0,40	20	—
3	о. Жилой	1953—1957	18	0,5	2 911 *	10,5	1,27	19	0,53	6	Максвелла
4	Нефтяные Камил	1961—1969	22	0,5	3 791 *	6,9	1,31	16	0,56	12	—
5 (64)	Аштеронский порог (ABC-1)	22 VI—3 VII 1966	100	10	520	11,9	1,16	26	0,40	20	—
6 (17)	Аштеронский порог (ABC-2)	22 VI—3 VII 1966	100	50	541	8,3	1,28	25	0,43	14	—
7 (23)	о. Нарген	27—30 XIII 1974, 20—29 I 1975, 10—21 II 1976	12	1	4 791	5,0	1,38	12	0,62	24	Максвелла
8 (25)	б-ка Макарова	12—20 III, 28 III—10 IX, 3—14 X 1976	53	10	3 720	9,9	1,53	2	0,73	46	Максвелла Нормальный
9 (34)	Возморье р. Куры	I, III, IX, X, IX 1961, III, V, X, IX 1962, V, VII, IX 1963 (по 3 сут в месяц)	14	0,5	2 105	18,2	1,25	20	0,50	0	Максвелла —
				5	1 571	17,9	1,34	15	0,59	18	—
				12	2 145	18,3	1,46	7	0,68	36	Нормальный
10 (39)	Астара	2—8 IX, 13—23 VIII 1976	38	1	709	9,4	1,42	10	0,65	30	»
				10	950	8,7	1,34	15	0,58	16	—
11 (41)	б-ка Каменная	11—14 X 1976, 8—13 VII 1977	48—50	1	744	9,4	1,55	1	0,74	48	Нормальный
				10	367	9,9	1,88	31	0,28	44	—
				20	332	11,0	1,17	25	0,41	18	—
12 (46)	Ноушехр	15 VIII—2 IX, 5 XII 1976, 14—30 VI 1977, 13—26 X 1978	50	10	2 280	11,8	1,36	13	0,60	20	Максвелла Нормальный
				20	3 247	13,3	1,60	2	0,78	56	—
				45	1 925	14,3	1,42	10	0,65	30	Нормальный »
13 (51)	б-ка Гранитный Вулкан	26 V—2 VI 1979	45	10	760	8,7	1,20	24	0,48	4	Максвелла
				25	277	8,4	1,19	24	0,44	12	»
14 (60)	б-ка Ливанова	1—4 VIII, 7—11 VIII, 5—9 IX, 22—25 IX, 25—29 X 1973, 22—27 IV 1976	55	10	1 508	7,9	1,42	10	0,65	30	Нормальный
				25	2 033	11,6	1,41	10	0,64	28	»
15 (59)	б-ка Жданова	23—26 X 1975	12	1	1 020	4,7	1,60	2	0,78	56	»
				5	948	5,4	1,60	2	0,79	58	»
				8	910	6,0	1,47	6	0,69	38	»
16 (57)	п-ов Челекен	1—9 IV 1976	54	10	2 280	7,1	1,42	10	0,65	30	»
				25	2 226	5,7	1,31	16	0,56	12	—
17	Челекен (остакада)	1962—1974	7	0,5	8 352 *	6,6	1,45	8	0,66	32	Нормальный
				33	13 605	5,7	1,36	13	0,60	20	—
18 (65)	м. Куули	17—27 VII 1967, 28 XI—6 XII 1976	22—26	7	1 038	10,5	1,13	28	0,36	28	Нормальный
				10	1 964	7,8	1,13	28	0,35	28	—
				25	1 216	5,9	1,16	24	0,42	16	—
19 (66)	У прол. Караг-Богаз-Гол	20—23 X 1981, 20—22 VIII, 16—18 X, 10—13, 15—18 XII 1982, 17 I 1983	34	0,5	632	11,9	1,24	21	0,49	2	Максвелла
				10	508	8,6	1,26	20	0,51	4	»
				30	629	8,1	1,29	18	0,54	8	»
20 (67)	У прол. Караг-Богаз-Гол	21—24 XII 1981, 16—19 VIII, 21—23, 25—26 X, 10—13, 15—18 XII 1982, 9—12 I, 20—23 V 1983	11,5	0,5	851	13,7	1,44	8	0,56	32	Нормальный
				5	618	9,9	1,34	15	0,63	26	—
				10	632	8,2	1,31	16	0,56	12	—

Примечания. 1. Звездочка * означает дискретность наблюдений 6 ч (по остальным пунктам — 30 мин).

2. Номер станции в скобках соответствует номеру на рис. 12.6.

3. \bar{W} — средняя скорость течения; W_n — среднеквадратическая скорость; σ — среднеквадратическое отклонение.

оценивались в процентах. Хорошая согласованность с теоретическим законом принималась при отклонении от критерия до 10 %.

Направления течений также аппроксимируются теоретическими законами распределения — нормальным, Максвелла и Пуассона [156].

12.2.4. Градиентные течения

На существенную роль течений, обусловленных нагонами (градиентных), в общем движении вод Каспийского моря указывали многие исследователи [273, 337, 407, 453]. Для оценки условий, способ-

ствующих возникновению градиентных течений, были рассмотрены все случаи нагонов с 1935 по 1965 г. Этот период был выбран не случайно — в него вошли годы с наблюдениями на уровнях постах южного побережья: Энзели (Пехлеви) и Ноушехр.

Особенности физико-географических условий отдельных районов Каспийского моря обуславливают значительные различия в высотах нагонов и сгонов.

При ветрах северной четверти области нагонов располагаются у северного побережья Апшеронского полуострова, в юго-западном районе моря и у южного побережья. Юго-восточный и восточный

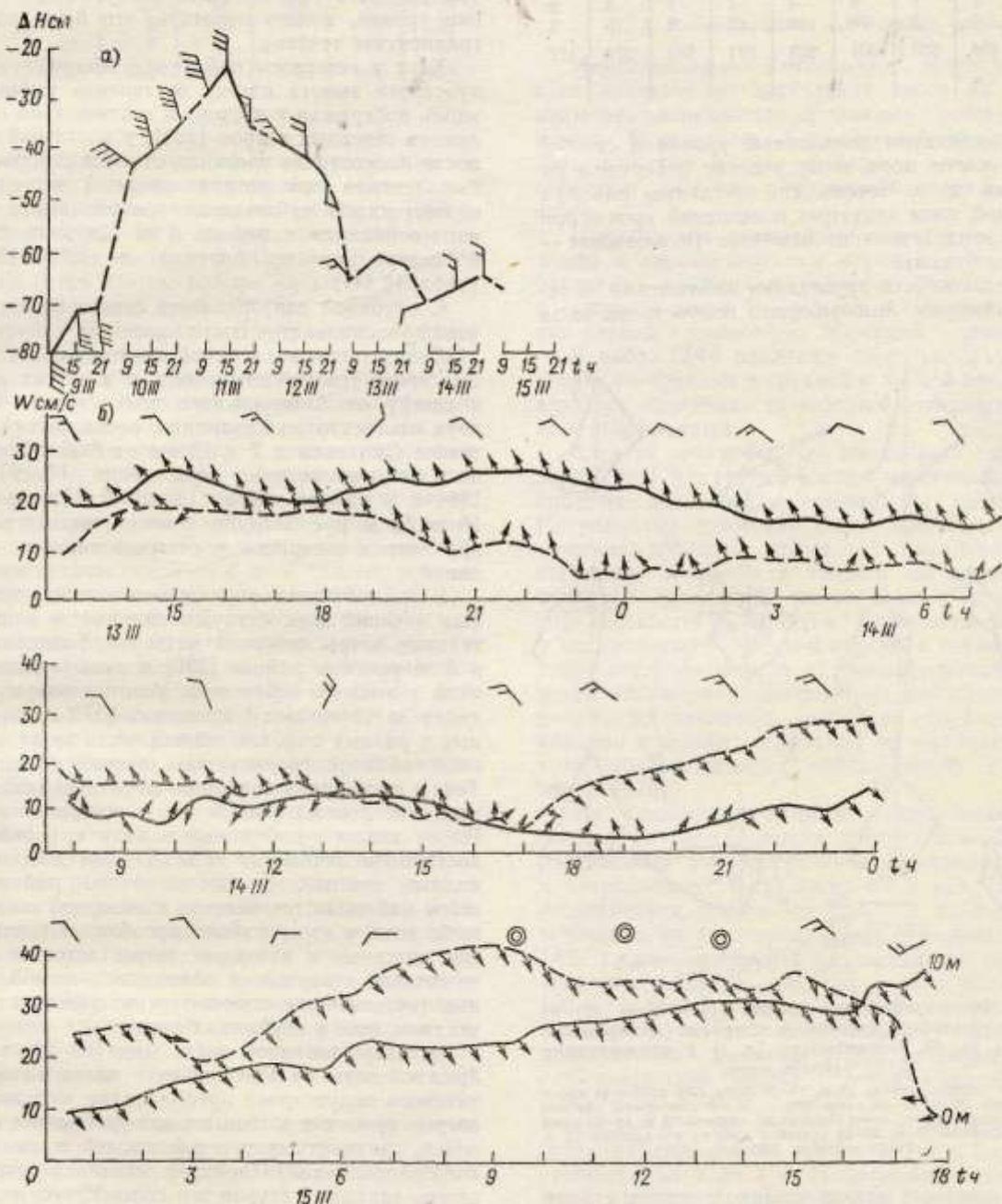


Рис. 12.14. Повышение уровня ΔH у Апшеронского полуострова (Сумгайт) при северном ветре 9—11 марта 1962 г. (а) и градиентные течения, измеренные 13—14 марта 1962 г. на многодневной станции (глубина 31,5 м) (б).

Таблица 12.14

Повторяемость направлений течений (%) на поверхности при разных ветрах по данным ст. Банка Дарвина (1956—1958 гг.), глубина 7,5 м

Направление течения	Направление ветра							
	СЗ	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З
СЗ	8	7	16	39	48	43	30	25
С	3	3	5	7	14	16	15	8
СВ	33	28	28	15	16	21	32	41
В	38	36	18	9	5	6	12	24
ЮВ	7	8	5	4	2	2	1	3
Ю	3	3	2	3	1	2	1	1
ЮЗ	3	7	8	4	1	1	3	2
З	5	8	19	19	13	9	6	6
Число случаев	488	538	301	268	571	664	273	127

ветры способствуют повышению уровня в северо-западной части моря и на участке побережья от Махачкалы до о. Чечень. По остальным районам прибрежной зоны заметных повышений уровня при усилении этих ветров не отмечено (исключение — небольшие бухты).

Ввиду сложности проведения наблюдений за течениями севернее Апшеронского полуострова из-за

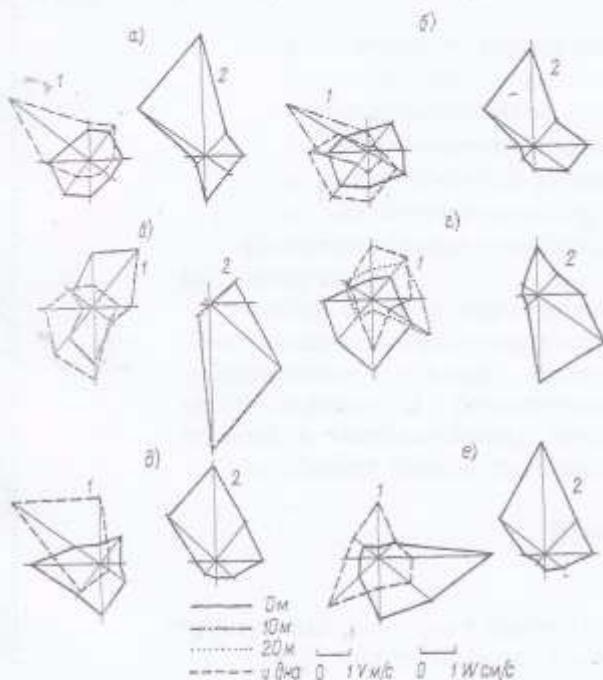


Рис. 12.15. Розы градиентных течений (1) и ветра (2) по данным многосуточных станций к северу от Апшеронского полуострова (а, б), юго-западного (в, г) и юго-восточного (д, е) районов моря.

а — 7,5 км от берега, глубина 14 м, 17—20 июля 1984 г.; б — 19 км от берега, глубина 29 м, 17—20 июля 1984 г.; в — у Ленкорана, глубина 10,5 м, 9—14 июня 1984 г.; г — у Ленкорана, глубина 22 м, 14—20 июня 1984 г.; д — глубина 33 м, 24—26 сентября 1983 г.; е — глубина 13 м, 24—26 сентября 1983 г.

частых и сильных ветров северной четверти и отсутствия укрытий для судов количество этих наблюдений невелико. Из числа имеющихся записей течений с помощью самописца БПВ-2 выбраны те,

которые можно отнести к градиентным. Это наблюдения на многосуточной станции в 18 км к северу от Апшеронского полуострова (г. Сумгант), проведенные 13—16 марта 1962 г., через двое суток после ослабления сильного северо-западного ветра, вызвавшего 9—11 марта нагон у побережья Апшеронского полуострова. Высота нагона у г. Сумганта составила 50 см. Течение имело северо-западное направление и скорости около 15 см/с на поверхности и 18—20 см/с на горизонте 10 м (в придонном слое наблюдения не проводились) (рис. 12.14).

Поскольку, в отличие от ветрового, градиентное течение медленно развивается и затухает и с учетом того, что течение было измерено при понижении уровня, можно полагать, что было выделено градиентное течение.

Хотя у северного побережья Апшеронского полуострова высота нагона постепенно уменьшается вдоль побережья к востоку в соответствии с ослаблением северных ветров [230], у восточной оконечности полуострова часто отмечаются северо-восточные течения при ветрах северной четверти. Это подтверждают наблюдения, проведенные с отдельного основания в районе б-ки Дарвина (в 5 км к северу от о. Артема) в 1956—1958 гг. (табл. 12.14).

С глубиной повторяемость северо-восточных течений увеличивается почти вдвое.

Возрастание с глубиной повторяемости встречных ветру течений отмечается и в других районах к северу от Апшеронского полуострова. Так, из двух многосуточных станций, расположенных восточнее Сумганта в 7 и 19 км от берега, проводились одновременные наблюдения 17—20 июля 1984 г. в районе глубин 14—29 м. На горизонтах 10 и 25 м преобладали течения на северо-запад при ветрах северного и северо-западного направлений.

В южной части моря возникновению градиентных течений способствуют сильные и продолжительные ветры северной четверти, развивающиеся в Апшеронском районе [230] и вызывающие нагон воды у южного побережья. Многосуточные наблюдения за течениями с помощью БПВ-2, выполненные в разных районах южной части моря, показывают наличие градиентных течений (рис. 12.15). Так, в юго-западном районе моря преобладают течения не только южной, но и северной четверти. Вдоль южного побережья наряду с устойчивыми восточными течениями наблюдаются северные и западные течения. В юго-восточном районе чаще всего наблюдаются течения с северной составляющей, хотя в этом районе преобладают западные, юго-западные и северные ветры летом и северо-восточные, северные и восточные — зимой. Северные течения чаще отмечаются не только в поверхностном, но и в глубинных слоях.

В северо-западной части моря на участке прибрежной зоны от Махачкалы и далее вдоль Агранинского полуострова преобладание юго-восточных ветров приводит к повышению уровня и возникновению градиентных течений южного и юго-восточного направлений. Наряду с действием северных и северо-западных ветров это способствует «постоянству» течений, направленных вдоль западного берега на юг, что отмечается всеми исследователями течений Каспийского моря.

Таблица 12.15

Повторяемость направлений течений (%) при разных ветрах по рейдовым наблюдениям у Махачкалы (1948—1962 гг.)

Направление течения	Направление ветра					
	СЗ	В	юз	Ю	юз	З
СЗ	25	9	5	11	8	17
С	6	2	2	—	3	2
СВ	5	6	2	2	5	3
В	7	12	9	7	8	6
ЮВ	14	37	35	24	18	24
Ю	11	20	27	26	26	11
ЮЗ	16	6	9	17	19	21
З	16	8	11	13	13	16
Число случаев	358	223	333	105	239	339

Это подтверждается данными наблюдений за течениями на рейдовых пунктах в районе Махачкалы, которые проводились ежедекадно с 1948 по 1962 г. в зоне глубин 12—15 м на расстоянии 18 км от берега. Наиболее высокую повторяемость при юго-восточном ветре в этом районе имеют юго-восточные и южные течения (табл. 12.15).

Измерения на взморье р. Самура в июне и сентябре 1970 г. отметили распространение градиентных течений на довольно значительное расстояние от района, где наблюдался нагон. Две буйковые станции, установленные в створе р. Самура на расстояниях 13 и 33 км от берега, а также наблюдения на ГМС Изберг с 21 по 24 сентября при юго-восточном ветре отметили течение навстречу ветру. Поскольку в северо-западной части моря при этом наблюдалось повышение уровня, вызванное юго-восточным ветром силой от 4 до 7 баллов, возникшее течение можно отнести к градиентным.

Срочные наблюдения в ряде пунктов (Астара, Энзели, Гасан-Кули, Огурчинский остров, Сумгант, Махачкала) показывают, что нагоны достигают 60—70 см уже при скоростях ветра 18—20 м/с. При определенной скорости ветра (от 20 до 28 м/с) повышение уровня прекращается.

Начало нагонов во всех указанных районах в основном совпадает с началом действия ветра. Сдвиг во времени наступления «пика» уровня по отношению к максимальной скорости ветра может составить 6—12 ч, реже 24 ч и более. Благоприятные условия для возникновения градиентных течений чаще всего создаются в районе северного побережья Апшеронского полуострова, где расположена область максимальных ветров и отмечается наибольшее количество дней с сильными и продолжительными северными и северо-западными ветрами.

Скорости градиентных течений в среднем составляют 10—25 см/с. При этом на поверхности скорости несколько меньше, чем на нижележащих горизонтах.

Измеренные максимальные скорости градиентных течений у Агранинского полуострова и у о. Чечень в феврале, июне, октябре 1982 и июне 1983 гг. достигали 40—70 см/с.

Наблюдения за течениями, проведенные в юго-западном районе (около 38° с. ш. и южнее), отмечают значительные скорости. Так, в районе Астары

(глубина 38 м) на горизонте 10 м наибольшие скорости достигали 40—56 см/с, в районе б-ки Каменной (глубина 50 м) такие скорости измерены на поверхности и горизонте 10 м. У иранского побережья в зоне глубин 50 м также измерены максимальные скорости от 40 до 60 см/с у течений как южной, так и северной четверти.

Приведенные наибольшие измеренные скорости течения, по-видимому, не являются максимально возможными, так как в большинстве случаев наблюдения проводились при слабых ветрах и продолжительность их недостаточна для получения надежных экстремальных значений.

12.2.5. Мезомасштабная изменчивость течений

Мезомасштабная изменчивость течений охватывает диапазон от нескольких часов до суток и включает инерционные, приливные и сейшевые движения. Замкнутость Каспийского моря способствует развитию в нем свободных инерционных и сейшевых движений, приливные явления выражены слабо.

Инерционные движения обусловлены вращением Земли и характеризуются временным масштабом, близким к локальному значению $T = 12/\sin \phi$, где ϕ — широта места; T — период, ч. Средний для Каспия период инерционных движений — около 17,5 ч.

В табл. 12.16 показаны несколько случаев течений, измеренных в средней и южной частях моря, характер изменчивости которых позволяет отнести их к инерционным.

Следует оговорить, что имеющиеся данные недостаточны для установления особенностей инерционных движений и причин, их вызывающих. Инерционные движения были выявлены при построении графиков временной изменчивости направления и скорости течений по характерному признаку — движению частиц воды в горизонтальной плоскости по орбитам, близким к круговым, в направлении по часовой стрелке с периодом, значение которого зависит от географической широты места наблюдений. Выявленные непостоянство периода этих движений, колебания его в интервале, близком к периоду колебаний на определенной широте, подтверждаются наблюдениями на других морях [278].

Из имеющихся данных можно выделить несколько случаев, дающих представление о пространственном распространении движений, близких к инерционным. С 23 июня по 3 мая 1966 г. на Апшеронском пороге проводились наблюдения за течениями на двух автономных буйковых станциях (АБС), расположенных на восточном (АБС-1) и западном (АБС-2) участках порога с глубинами 100 м, а также в центральной части порога (глубина 190 м) на якорной станции. На АБС наблюдения велись с помощью БПВ-2, на якорной — морской вертушкой (ВММ). Горизонты наблюдений на АБС-1 — 50 и 90 м, на АБС-2 — 10, 50 и 90 м, на якорной — 0,5; 10; 25; 50; 100 и 180 м. Дискретность наблюдений на АБС — 30 мин, на якорной станции — от 2 до 4 ч. Наблюдения показали довольно сложную динамическую картину, сложившуюся в этот период над порогом. В общем виде водообмен, который осуществляется через порог между средней и южной частями моря, выглядит

Таблица 12.16

Течения с периодом колебаний, близким к инерционному

Район наблюдений	Период наблюдений	Глубина, м	Горизонт, м	Широта φ	T (φ) ч	T (по наблюдениям) ч
Иранское побережье (у Ноушхара), АБС Взморье р. Куры	17—25 VI 1977 18—26 VIII 1976 15—18 V 1984	50 50 28	10 20 0,5 25	36°40'	20	21, 20, 18, 21, 16, 18, 18 16, 17, 18, 15, 15, 19, 15 21, 20, 18 18, 20
Алшеронский порог: АБС-2	23 VI—2 VII 1966	100	10 50	40 18	18,4	17, 17, 19, 17, 19, 17, 17 19, 21, 18, 16, 20, 19, 20, 17, 17, 18 19, 19, 15, 18, 17, 18, 18
Икорная станция	24—25, 27—29 VI 1966	180	90 0,5 5 10 20 50—80	40 17	18,4	15, 15 18, 12 16, 15 16—20
м. Суз м. Рахущечный м. Меловой	18—20 VIII, 1962 15—17 VIII, 1962 21—22, 23—26 VII 1962	27 27 30	5 5 0,5 10 20 28	41 20 42 40 43 40	18,0 17,6 17,4	17, 20 17, 19 21, 9, 15 16, 16, 15, 19 16, 19, 15 18, 20

так: над западной частью порога происходит перенос вод из средней части в южную, над восточной — из южной в среднюю. В период наблюдений на западном участке весь слой воды от горизонта 10 м до придонного (50 м) был охвачен инерцион-

ными движениями (рис. 12.16), над центральной частью эти движения прослеживались только в верхнем 20-метровом слое (рис. 12.17), в глубинных слоях преобладало течение южной четверти. Над восточным участком порога в верхнем 50-мет-

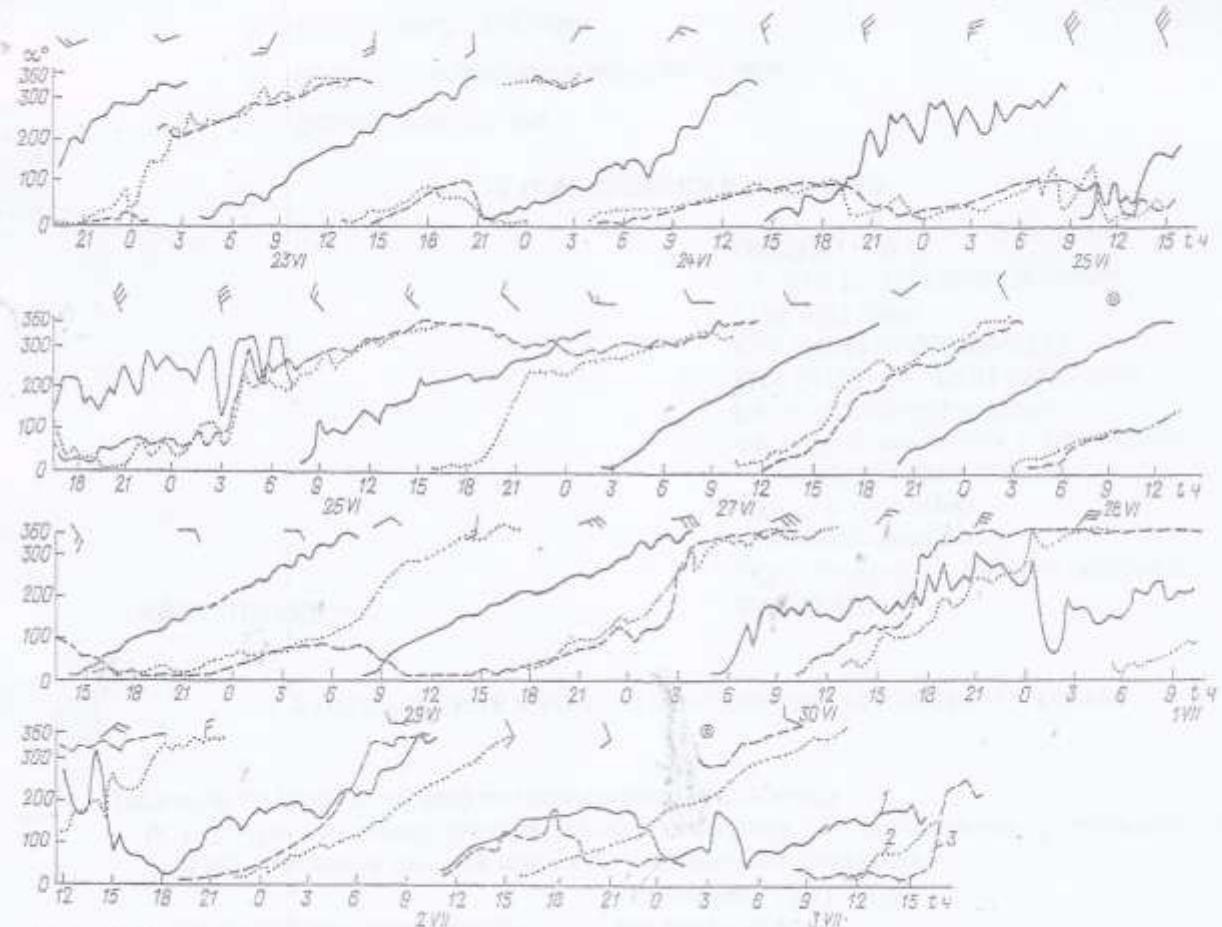


Рис. 12.16. Изменчивость направления течений по наблюдениям на Алшеронском пороге 22 июня—3 июля 1966 г.
(АБС-2, глубина 100 м) на горизонтах 10 (1), 50 (2) и 90 м (3).

ровом слое наблюдений не было, в придонном слое течение было направлено на северо-запад.

Инерционные движения над Апшеронским порогом распространялись в глубину с некоторым запаздыванием (до 6 ч) начала очередного цикла на нижележащих горизонтах по отношению к поверх-

ностному.

Наблюдениями в разных прибрежных районах моря — у восточного и иранского побережья, на взморье р. Куры — отмечены инерционные движения только в глубинных слоях при отсутствии их в поверхностном слое (рис. 12.18).

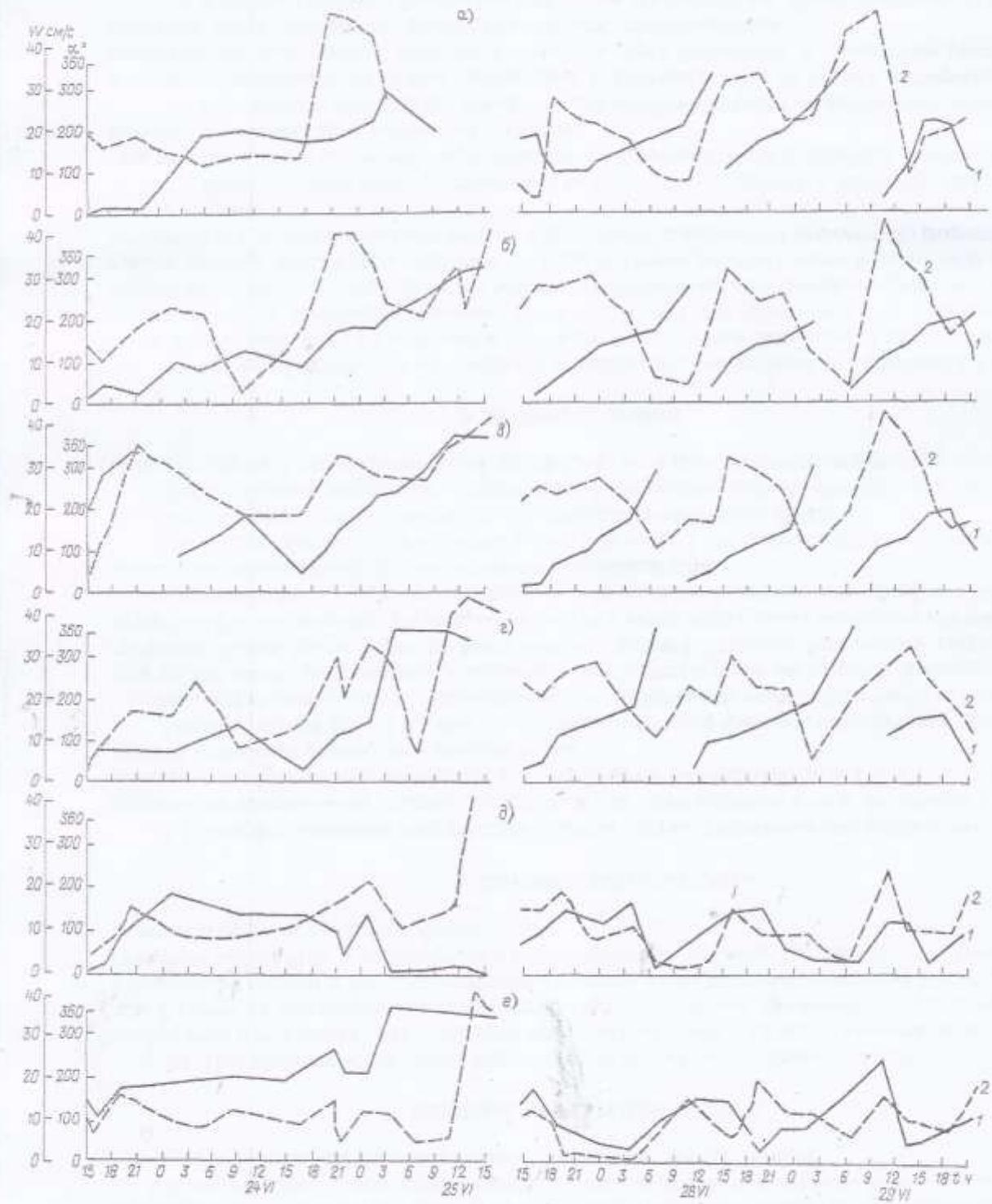


Рис. 12.17. Направление α (1) и скорость W (2) течения на многосугодичной станции в районе Апшеронского порога ($40^{\circ}17'$ с. ш., $51^{\circ}26'$ в. д., глубина 190 м) 24—25 и 27—29 июня 1966 г. на горизонтах 0,5 (а), 5 (б), 10 (в), 25 (г), 50 (д) и 100 м (е).

Большинство исследователей полагают, что инерционные движения возникают в результате локального штормового воздействия. Подтверждением этому служит упомянутый случай наблюденных инерционных движений над Алишеронским порогом

В других случаях в период, предшествующий наблюдениям, и во время измерения течений наблюдались слабые, переменные по направлению ветры. Возможно, в таких ситуациях возбуждение инерционных течений происходит под влиянием

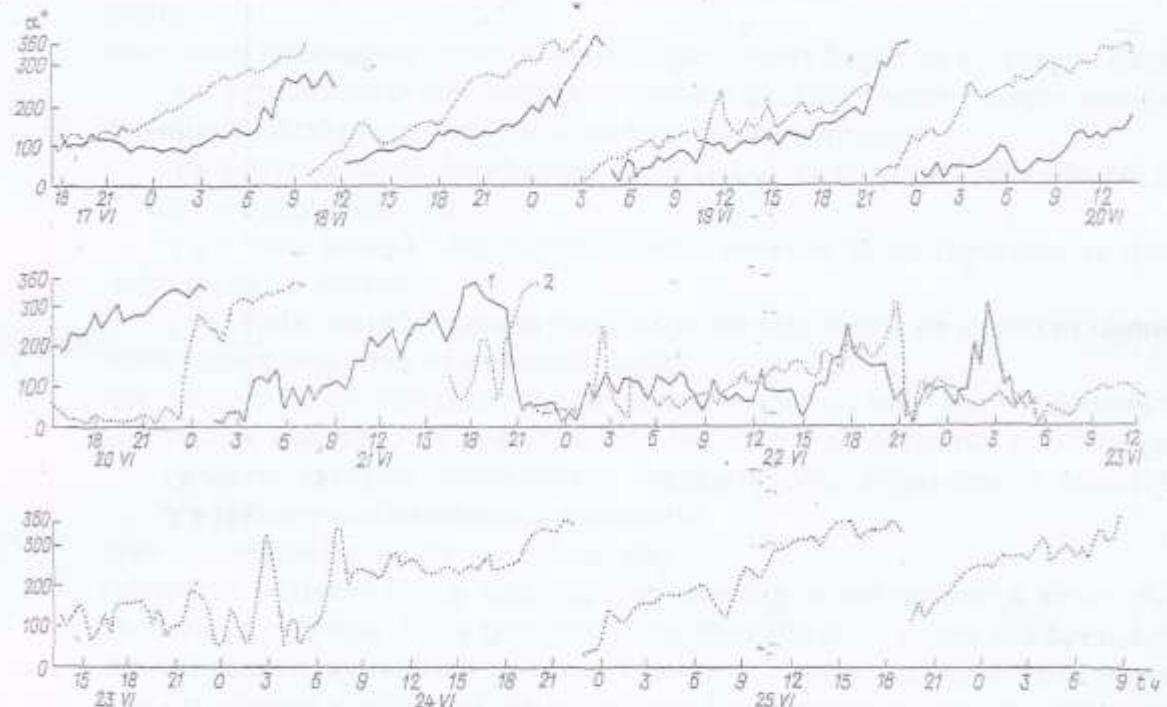


Рис. 12.18. Изменчивость направления течений α у иранского побережья (ст. 46, глубина 50 м) на горизонтах 10 (1) и 20 м (2) 17—26 июня 1977 г.

23 июня — 3 июля 1966 г. По данным гидрометстанции Нефтяные Камни, в период, предшествующий наблюдениям (20—21 июня), в этом районе отмечался сильный северо-западный ветер со скоростями 12—18 м/с. К моменту начала наблюдений (19 и 22 июня) скорость ветра уменьшилась до

сейшевых или приливных явлений, поскольку в момент измерения течений отмечены периодические колебания уровня приливного и сейшевого характера. Об этом свидетельствует синхронный график временной изменчивости течений и уровня в районе м. Мелового (рис. 12.19).

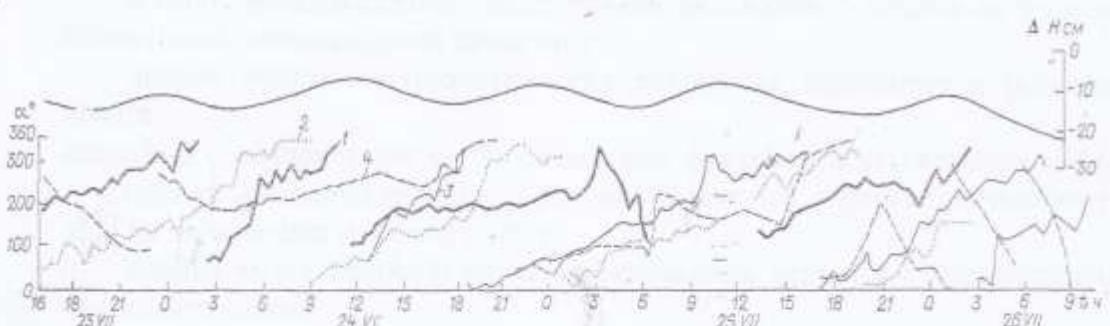


Рис. 12.19. Изменчивость направления течений α у м. Мелового (глубина 30 м) и уровень ΔH у Бекдаша 23—26 июля 1982 г. при слабом северо-западном ветре на горизонтах 0,5 (1), 10 (2), 20 (3) и 28 м (4).

4 м/с и весь период наблюдений преобладали слабые ветры северной и южной четвертей с кратковременными усилениями до 4—5 баллов. В восточной части порога (по данным гидрометстанции Куули-Маяк) весь месяц наблюдались слабые ветры.

Возникновение инерционных течений только в глубинных слоях, возможно, связано с наличием внутренних сейш и внутренних приливов в слое термоклина.

С помощью спектрального анализа были выявлены инерционные движения в районе Бакинского

архипелага и на взморье р. Куры по данным измерений течений на б АБС, проводившихся более месяца (1975—1979 гг.). В результате анализа было установлено, что в прибрежной зоне причиной, способствующей возникновению инерционных движений, является непосредственное воздействие ветра. В областях с резким изменением глубин (на свале глубин) инерционные движения возникают под воздействием топографических волн с частотами, близкими к инерционным [189].

течений по орбитам, близким к круговым, против часовой стрелки с преобладающими периодами 3—6 ч.

Наблюдения на двух многодневных станциях выполнены одним судном в районе прол. Караг-Богаз-Гол в точках с глубинами 10 и 33 м (14—16, 20—23 октября 1979 г.). Эти наблюдения, несмотря на разрыв между ними, дают основание полагать, что сейшевые течения могут существовать длительное время и распространяться на значительное про-

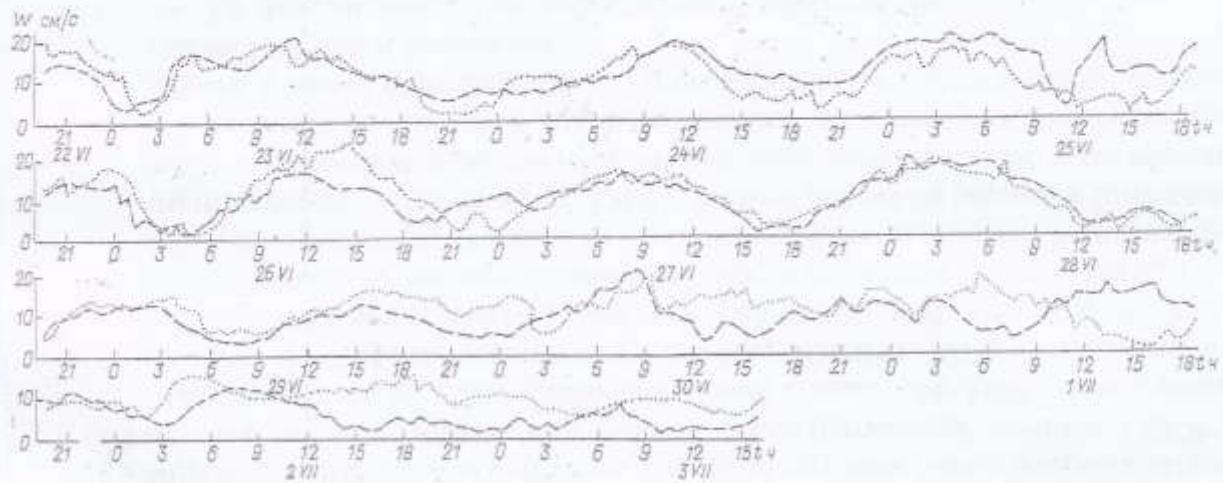


Рис. 12.20. Изменчивость скорости течения W на Апшеронском пороге 22 июня—31 июля 1966 г. (АБС-2, глубина 100 м) на горизонтах 50 (1) и 90 м (2).

Для скоростей инерционных течений характерно периодическое изменение их значений с периодом, близким к периоду изменения направлений течений. Диапазон изменчивости скоростей течений — от 10—20 до 30—50 см/с (рис. 12.20).

В некоторых щельевых районах средней и южной частей моря были измерены течения, характер временной изменчивости которых позволяет отнести их к сейшевым. Основанием для этого послужили следующие признаки: вращение течений против часовой стрелки по орбитам, близким к круговым, с периодами от 2 до 10 ч.

Известно, что сейшевые колебания представляют собой вертикальные и горизонтальные смещения водных частиц. Горизонтальные смещения имеют возвратно-поступательный или круговой характер и образуют сейшевые течения.

Изучением сейшевых колебаний в Каспийском море в разное время занимались многие исследователи [102, 189, 212, 226, 242]. На основании анализа уровенных метеографических наблюдений, применения спектрального анализа были выявлены сейши с периодами 10—40 мин; 1,5; 2,75; 3—4; 4,7 и 9—12 ч. Разнообразие периодов сейшевых колебаний отмечено и на других морях.

Причины возникновения сейши разнообразны, но основные — это воздействие ветра и изменение атмосферного давления. Для такого замкнутого бассейна, как Каспий, немаловажное значение имеют приливы.

Показательными примерами сейшевых течений служат течения, измеренные в районе прол. Караг-Богаз-Гол, у о. Свинаго (рис. 12.21), на взморье р. Куры. Эти наблюдения показывают вращение

странство. В этих наблюдениях отмечена характерная особенность: при преобладании периодов вращения от 3 до 5 ч зафиксирован случай (14—16 октября) постепенного увеличения периода от 5 до 11 ч и его последующего уменьшения до 4—5 ч. Подобное явление обнаружено и на трехдневной станции (глубина 30 м) у о. Свинаго, но только на горизонте 27 м, где наблюдались сейшевые течения. Здесь увеличение периода происходило от 3 ч 30 мин до 10 ч и тоже с последующим уменьшением (20 июля). Наблюдения у о. Свинаго интересны тем, что сейшевые течения обнаружены в придонном горизонте и, возможно, связаны с внутренними волнами, возникающими в слое термоклина, который в летнее время в этом районе располагается между горизонтами 30 и 50 м, а в отдельные годы может подниматься и выше.

Сейшевые течения с периодом 3—6 ч только на горизонте 10 м были измерены на многодневной станции у северного побережья Апшеронского полуострова (глубина 25 м). Хотя станция выполнялась с перерывами (17—18, 21—22, 24—25 декабря 1981 г.), можно считать продолжительность существования этих течений около 9 сут (а возможно, и больше), так как они наблюдались при каждом возобновлении работы станции. При этом в поверхностном слое преобладали течения северной четверти, а в придонном — преимущественно западного, юго-западного и юго-восточного направлений. В начале наблюдений действовал северный ветер, а затем юго-западный, скорости ветра в основном не превышали 10 м/с (22 декабря ветер усилился до 15 м/с).

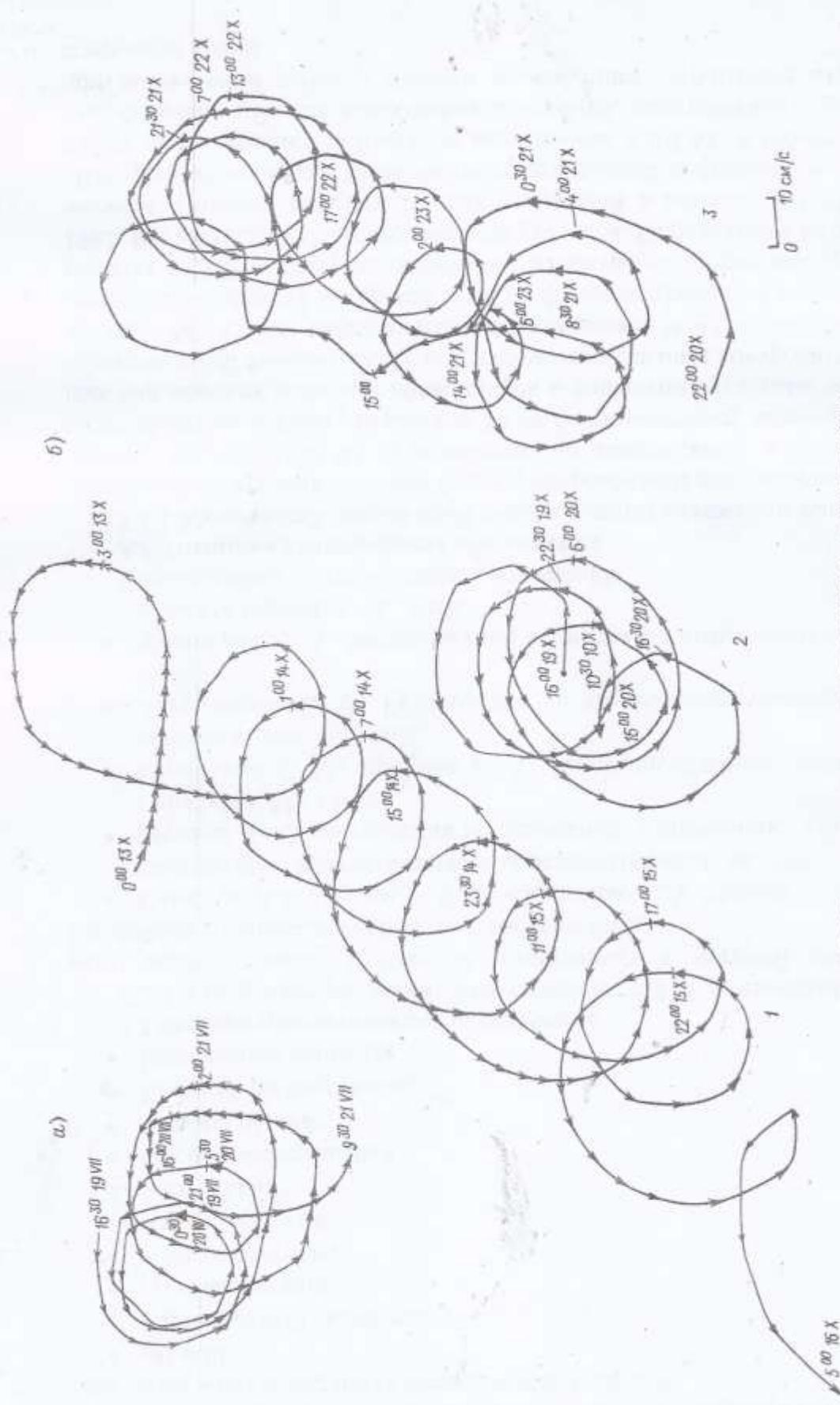


Рис. 12.21. Прогрессивно-векторные графики течений в различных районах.
а — у о. Сланного, горизонт 27 м, глубина 30 м, 19—21 июля 1979 г.; б — у пр. Кара-Балта-Гол 13—15 октября (1), 19—20 октября (2) (горизонт 0,5 м, глубина 10 м) и 26—28 октября 1981 г.

Сейшевые течения с периодом 2 ч 30 мин—3 ч отмечены в разных районах прибрежной зоны: у северного побережья Апшеронского полуострова (20—21 июля 1982 г., 17—20 мая 1984 г., глубина 29 м), м. Мелового (20—21 февраля 1982 г., глубина 17 м), м. Песчаного (13 февраля 1982 г., глубина 32 м), прол. Кара-Богаз-Гол (15—18 декабря 1982 г., глубина 35 м). Ветер во всех случаях не отличался устойчивым направлением, а скорости его изменялись от 1—2 до 10 м/с.

Скорости сейшевых течений колеблются в пределах 10—30 см/с. Максимальные значения, измеренные во время наблюдений, достигали 40 см/с. В отличие от инерционных течений, скорости сейшевых течений не подвержены циклической изменчивости. Наблюдающиеся небольшие увеличения скорости, вероятно, вызваны усилением скорости ветра.